

Vol.57



Análisis Geográficos

Revista del Instituto Geográfico Agustín Codazzi

ISSN (impreso) 0120-8551 ISSN (electrónico) 2590-7123



Análisis Geográficos

Revista del Instituto Geográfico Agustín Codazzi

Número 57, ENERO – JULIO de 2024

ISSN (Impreso) 0120-8551 ISSN (Electrónico) 2590-7123

Dirección de
INVESTIGACIÓN
y Prospectiva

Análisis Geográficos Revista del Instituto Geográfico Agustín Codazzi

ISSN (Impreso) 0120-8551
ISSN (Electrónico) 2590-7123

©Instituto Geográfico Agustín Codazzi
Dirección de Investigación y Prospectiva

La revista *Análisis Geográficos* es una publicación de carácter técnico-científico y divulgativo, con periodicidad semestral, del Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Desde su primer número, publicado en 1982, la revista es uno de los canales institucionales para difundir los avances y los resultados de los proyectos I-D-I y demás actividades misionales, pero también es un medio de divulgación abierto a toda la comunidad científica, académica y demás interesados del país y de la región, en torno de la información geográfica, cartográfica, agrológica, catastral, geodésica y las de tecnologías geoespaciales, en vista de su aplicación en los procesos de gestión del conocimiento, planificación y desarrollo integral de los territorios.

número 57, enero – julio de 2024

Análisis Geográficos es publicada por la Dirección de Investigación y Prospectiva del Instituto Geográfico Agustín Codazzi y proporciona un acceso abierto a su contenido, basado en el principio de que ofrecer al público un acceso libre a las investigaciones ayuda a un mayor intercambio global del conocimiento.

Esta obra está bajo una licencia de *Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional*. Estos términos aplican a menos que se establezca de otra forma y pueden ser consultados en <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>

Editor

Johan Andrés Avendaño Arias

Asistente Editorial

Sofía Alejandra Estrada Cely

Contacto

Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC
Dirección de Investigación y Prospectiva

Carrera 30 #48-51

Código postal: 111321, 111311. Bogotá DC, Colombia
Correo electrónico: analisisgeograficos@igac.gov.co

Comité Editorial

Alexander Ariza
Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Colombia

Delfina Trinca Fighera
Universidad de Los Andes, Venezuela

Everaldo Batista da Costa
Universidade de Brasília, Brasil

Jhon Williams Montoya Garay
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Comité Científico

Carmen Valverde Valverde
Universidad Nacional Autónoma de México, México

Daniel Hiernaux Nicolas
Universidad Autónoma de Querétaro, México

Joel Francisco Mejía Barazarte
Universidad de Los Andes, Venezuela -
Universität Hamburg, Alemania

José Rojas López
Universidad de Los Andes de Mérida,
Venezuela

Liliana López Levi
Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Xochimilco, México

Luis Manuel Cuevas Quintero
Universidad Pedagógica Nacional Unidad
Ajusco, México

Marcos Aurelio Saquet
Universidade Estadual do Centro-Oeste
do Paraná, Brasil

Diseño y diagramación

Gabriela Amaya Vásquez
Jose Castro Garnica

Edición y corrección de estilo

Sofía Alejandra Estrada Cely
Gian Carlos López González
Ángela Marcela Ortiz Rocha

Adecuación de figuras

María Paula Hernández
Sofía Alejandra Estrada Cely

Descargo de responsabilidad (Disclaimer)

Análisis Geográficos. Revista del Instituto Geográfico Agustín Codazzi hace todo lo posible para garantizar la fidelidad de la información contenida en sus publicaciones. Sin embargo, la Dirección de Investigación y Prospectiva del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, el Editor y el equipo editorial no realizan ninguna declaración ni ofrecen garantías en cuanto a la veracidad, integridad o idoneidad del contenido publicado para cualquier propósito o aplicación y rechazan todas las declaraciones y garantías, ya sean expresas o implícitas, en la máxima medida permitida por la ley. Por tanto, no pueden ser considerados responsables de los errores o cualquier consecuencia derivada del uso de la información contenida en esta revista. Los puntos de vista y opiniones expresadas no necesariamente reflejan las del Editor y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

Fotografía de portada:

Isaías Ramírez Espitia.

Lugar: laguna del municipio de La Primavera, departamento del Vichada.

Fecha: 27 de abril de 2023

Fue una fotografía tomada en un atardecer del 27 de abril de 2023 en la laguna del municipio de La Primavera, departamento del Vichada-Colombia. Mientras se llevaba a cabo la actualización catastral del municipio, después de una larga jornada de trabajo de campo, miro hacia el occidente y veo la hermosa configuración de los rayos del sol, las nubes, la vegetación y el espejo de agua para dar origen a uno de los más bellos paisajes naturales que pude evidenciar en mi visita a la región de los llanos orientales. Sin duda alguna el municipio de La Primavera tiene sus encantos paisajísticos.

Consejo Directivo

GUSTAVO FRANCISCO PETRO URREGO
Presidente de la República de Colombia

FRANCIA ELENA MÁRQUEZ MINA
Vicepresidenta de la República de Colombia

PIEDAD URDINOLA CONTRERAS
Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE

ALEXANDER LÓPEZ MAYA
Director Departamento Nacional de Planeación – DNP

IVÁN VELÁSQUEZ GÓMEZ
Ministro de Defensa Nacional

MARÍA SUSANA MUHAMAD GONZÁLEZ
Ministra de Ambiente y Desarrollo Sostenible

MARTHA CARVAJALINO
Ministra de Agricultura y Desarrollo Rural

GUSTAVO ADOLFO MARULANDA MORALES
Director General IGAC

MARTHA LUCÍA PARRA GARCÍA
Secretaría General IGAC

Comité directivo

GUSTAVO ADOLFO MARULANDA MORALES
Director General

DIEGO FERNANDO CARRERO BARÓN
Subdirector General (E)

JOHAN ANDRÉS AVENDAÑO ÁRIAS
Director de Investigación y Prospectiva

ÓSCAR ROMERO GUEVARA
Jefe Oficina Observatorio Inmobiliario Catastral

ANDERSON PUENTES CARVAJAL
Director Técnico Gestión de Información Geográfica

CARLOS ANDRÉS FRANCO PRIETO
Subdirector de Cartografía y Geodesia

RICARDO FABIÁN SIACHOQUE BERNAL
Subdirector de Agrología

MANUEL GUILLERMO BELTRÁN QUECAN
Subdirector de Geografía

MELISA LIS GUTIÉRREZ
Jefe Oficina Laboratorio Nacional de Suelos

LUISA CRISTINA BURBANO GUZMÁN
Directora de Gestión Catastral

JOHN GUIBSSON GARCÍA GUERRERO
Subdirector de Proyectos

ALEXIS JAVIER CARBONO MENDOZA
Subdirector de Avalúos

ANDRÉS FELIPE GONZÁLEZ VESGA
Director de Regulación y Habilitación

PERLA YADIRA ROJAS MARTÍNEZ
Directora de Tecnologías de la Información y Comunicaciones

DIANA ALEXANDRA RUIZ BEDOYA
Subdirectora de Información

FERNANDO PÉREZ MORENO
Subdirector de Sistemas de Información (E)

CRISTIAN JOSÉ PETRO PETRO
Subdirector de Infraestructura Tecnológica

MARTHA LUCÍA PARRA GARCÍA
Secretaría General

GLORIA MARLÉN BRAVO GUAQUETA
Subdirectora de Talento Humano

JAIME ALBERTO RODRIGUEZ MARIN
Subdirector Administrativo y Financiero

FABIÁN EDUARDO CAMELO SÁNCHEZ
Jefe Oficina Asesora de Planeación

CAMILA GUTIÉRREZ BARRAGÁN
Jefe Oficina Asesora Jurídica

ALEJANDRA MONTENEGRO PINZÓN
Jefe Oficina Asesora de Comunicaciones

ESPERANZA GARZÓN BERMUDEZ
Jefe Oficina de Control Interno

NATALIA ROJAS GONZÁLEZ
Jefe Oficina Control Interno y Disciplinario

MARÍA ALEJANDRA FERREIRA HERNÁNDEZ
Jefe Oficina de Relación con el Ciudadano

SONIA CÓRDOBA ALVARADO
Jefe Oficina Comercial

Análisis Geográficos

Revista del Instituto Geográfico Agustín Codazzi



Dirección de
INVESTIGACIÓN
y Prospectiva

Editorial

Geografías para la Vida: conectando conocimiento y acción para transformar nuestro futuro

Geographies for Life: Connecting Knowledge and Action to Transform Our Future

Gustavo Marulanda Morales y Johan Andrés Avendaño – Instituto Geográfico Agustín Codazzi – Bogotá, Colombia

Artículos

1. Análisis de modelos de regresión logística para la identificación de susceptibilidad a deslizamientos en la cuenca hidrográfica del río Guayuriba, Colombia

Analysis of Logistic Regression Models for the Identification of Landslide Susceptibility, Guayuriba River Basin, Colombia

Edgar Libardo Barahona Cantor - Universidad Distrital Francisco José de Caldas - Bogotá, Colombia

2. Análisis del comportamiento de los movimientos en masa en la microcuenca del caño Parrado en el municipio de Villavicencio

Analysis of the behavior of mass movements in the caño Parrado micro-basin in the municipality of Villavicencio

Andrea Carolina Qüenza Nieves, Alfonsina Bocanegra Gómez, Jorge Eliecer Pardo Mayorga y Juan Manuel Salgado Díaz - Universidad Santo Tomas Seccional – Villavicencio, Colombia

3. Detección y caracterización de procesos erosivos y movimientos en masa mediante el uso de tecnologías geoespaciales, Salento, Quindío – Colombia

Detection and Characterization of Erosion Processes and Mass Movement Through Geospatial Technologies, Salento, Quindío - Colombia

Seiry Soley Vargas Tejedor y Héctor Jaime López Salgado - Instituto Geográfico Agustín Codazzi - Bogotá, Colombia

4. Metodología para la definición de territorios en riesgo a ser deforestados en Colombia

Methodology for Definition of Territories at Deforestation Risk in Colombia

Andrés Felipe Cely, Lina Paola Arévalo, Miguel Serrano López, Camilo Andrés Albarracín y Adriana María Vargas - Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC) - Colombia

5. Grupos de uso y manejo de los suelos del Centro Agropecuario Marengo CAM

Soil Use and Management Groups of The Marengo Agricultural and Livestock Center CAM

Napoléon Ordoñez Delgado - Instituto Geográfico Agustín Codazzi – Bogotá, Colombia

6. Comparación de metodologías de aptitud de uso del suelo: hacia un enfoque alternativo, basado en la implementación de la Metodología Cervatana Modificada (MCM), municipio de Puerto Gaitán, Meta

Comparison of Land-use Suitability Methodologies: Towards an Alternative Approach, Based on the Implementation of the Modified Cervatana Methodology (MCM), Municipality of Puerto Gaitan, Meta

Alfonso López Moreno - GEODIM S.A.S. – Colombia

7. Zonificación agroecológica para el cultivo de café (Coffea arabica L) en el departamento de Santander mediante el método multicriterio en QGIS

Agroecological Zoning for Coffee crop (Coffea arabica L) in the Department of Santander Using the Multicriteria Method in QGIS

Laura Alejandra Agudelo Mayorga y Tatiana Santos Bohórquez - Universidad Nacional de Colombia - Bogotá, Colombia

8. Tensiones en torno a las representaciones y autorrepresentaciones de lo indígena en el Guaviare por la incidencia del turismo

Tensions Around the Representations and Self-representations of the Indigenous in Guaviare due to the Impact of Tourism

Sara Stefania Ruiz Sepúlveda, Axel Nicolás Arbeláez Vargas y Michaela Bartmann - Universidad Nacional de Colombia - Bogotá, Colombia

9. Afectación del páramo desértico por la actividad turística en el Parque Nacional Sierra de la Culata, Mérida-Venezuela

Affectation of The Desert Paramo by Tourism Activity in Sierra de La Culata National Park, Mérida-Venezuela

Anairamiz Aranguren Becerra e Iris M. Díaz Fernández – Universidad de Los Andes – Mérida, Venezuela

Elides Aquiles Sulbarán Zambrano - Comisión Mundial de Áreas Protegidas (CMAP-UICN), Venezuela

10. Trazando la evolución de Girardot: un estudio de morfología urbana asociada a ciclos económicos y sociales

Tracing the Evolution of Girardot: A Study of Urban Morphology associated with Economic and Social Cycles

Diego Javier Gómez, Andrés Felipe Pulido Otalora, Juan Sebastián Rodríguez López y Johan Sebastián Yazo Moreno - Universidad Nacional de Colombia - Bogotá, Colombia

11. Estrategia de localización con geomarketing y el Modelo de Huff: un enfoque para la expansión en el sector de comida rápida

Localization Strategy with Geomarketing and the Huff Model: An Approach to Expansion in the Fast-Food Sector

Katherine Santiago Monsalve y Gloria Yulier Cadena-Montero - Universidad de Los Andes - Mérida, Venezuela

4

8

28

44

54

70

84

102

122

140

155

170

Editorial

Geografías para la vida: conectando conocimiento y acción para transformar nuestro futuro

Geographies for Life: Connecting Knowledge and Action to Transform Our Future

El Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y su Dirección de Investigación y Prospectiva (DIP) se complace en compartir el nuevo número de la revista *Análisis Geográficos, en torno al eje temático editorial de Geografías para la vida*.

¿Por qué Geografías para la Vida? El IGAC, como máxima autoridad geográfica del país, asume la responsabilidad de disponer al servicio de la nación, del Estado y la ciudadanía todos sus esfuerzos para apoyar la consolidación de la paz territorial. En ese sentido, y materializando los compromisos del Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 de convertir a Colombia en una potencia de la vida, esta institución insta a reflexionar sobre cómo los saberes geográficos aportan en la coconstrucción de la paz del país y la dignificación de la vida individual y comunitaria. Por ello, se convocó a miembros de la comunidad académica e investigativa, organizaciones sociales y colectivas a aportar sus textos en forma de artículos de investigación, reflexión y revisión en torno de las *Geografías para la Vida*.

Análisis Geográficos: Revista del Instituto Geográfico Agustín Codazzi cuenta con una trayectoria de más de dos décadas como organismo de difusión de la investigación y producción de conocimiento en torno a los problemas que, desde el punto de vista académico y político, han interpelado la reflexión académica y la búsqueda de nuevo conocimiento al servicio del país. Desde su origen ha mantenido una línea editorial tendiente a la participación del IGAC como centro de referencia académica, investigación y conocimiento útil tanto en el plano del debate académico como técnico. En su etapa más reciente, la revista circuló en formato virtual, hecho que le permitió un mayor alcance y su anclaje en la corriente de difusión científica predominante. Esta trayectoria y difusión del conocimiento se traduce en 20 años de experiencia, dividido en cinco volúmenes digitales de alto alcance a la comunidad científica y 56 números publicados a lo largo de su historia.

En esta ocasión, *Análisis Geográficos: Revista del Instituto Geográfico Agustín Codazzi* ha organizado este número especial sobre *Geografías para la vida*, con una serie de artículos derivados de investigaciones de científicos nacionales e internacionales. En este ejemplar se incluyen once contribuciones de geógrafos, antropólogos, agrónomos, geólogos e ingenieros en distintas

áreas, en una fecunda multidisciplinariedad que permite tener una visión amplia de la geografía y su que hacer. Aunque se trate de distintas áreas del conocimiento, en todos los artículos confluyen en la preocupación y la búsqueda por comprender los procesos sociales y espaciales necesarios para garantizar la vida.

Se presenta un primer bloque de cuatro artículos que trabajaron la temática de movimientos de masa y riesgo siconaturales. El primer texto es un *Análisis de modelos de regresión logística para la identificación de susceptibilidad a deslizamientos en la cuenca hidrográfica del río Guayuriba, Colombia*, elaborado por Edgar Libardo Barahona Cantor. En este escrito, el autor planteó cartografiar la susceptibilidad a deslizamientos mediante el uso de dos modelos de regresión logística —ModeloDummy y ModeloCon—, para probar la efectividad del método bajo diferentes formas de entrenamiento. Demostró la efectividad de la regresión logística para el mapeo de la susceptibilidad a deslizamientos y permitió validar la superioridad de los modelos elaborados a partir de variables continuas frente a modelos elaborados usando variables dummy.

El segundo texto, escrito por Andrea Carolina Quienza Nieves, Alfonsina Bocanegra Gómez, Jorge Eliecer Pardo Mayorga y Juan Manuel Salgado Díaz, presenta un *Análisis del comportamiento de los movimientos en masa en la microcuenca del caño Parrado en el municipio de Villavicencio*, en este caso con un enfoque de gestión de riesgos con la formulación de medidas de mitigación y de prevención de desastres siconaturales. Los autores determinaron la susceptibilidad de movimientos en masa en la microcuenca del caño Parrado, a través de la recopilación y análisis de datos, siguiendo el método propuesto por el Servicio Geológico Colombiano a escala 1:25,000. Consideraron factores condicionantes como el contexto geológico, geomorfológico, cobertura del suelo, uso del suelo y otros factores como las precipitaciones para determinar las áreas de mayor riesgo.

Por su parte, Seiry Soleny Vargas Tejedor y Héctor Jaime López Salgado decidieron contribuir en la generación de insumos cartográficos con información de los procesos erosivos en la cuenca del río Navarre para ser utilizados en diferentes análisis en el marco del convenio establecido entre el IGAC y la Corporación Autónoma Regional del Quindío, instituciones que decidieron “Aunar esfuerzos para la realización de un estudio para la identificación, caracterización y espacialización cartográfica a escala 1:10,000 de los procesos erosivos en la unidad hidrográfica del río Navarre”.

El cuarto artículo de este bloque es el desarrollado por Andres Felipe Cely, Lina Paola Arévalo, Miguel Serrano López, Camilo Andrés Albarracín y Adriana María Vargas. Estos autores se preocuparon por uno de los temas que más interés ha cobrado en los últimos años: la deforestación en la Amazonía, por lo que plantearon una metodología de valoración de territorios en riesgo de deforestación a escala municipal. La valoración del riesgo la realizaron mediante la combinación de una medición de amenaza, que tuvo en cuenta la concentración y tendencia de la deforestación, y de una medición de vulnerabilidad bajo cinco categorías. Los resultados indican que las zonas de riesgo alto y muy alto se concentran en la región de transición Orinoquía-Amazónica. Además, desarrollaron un índice de riesgo de deforestación compuesto que permitió tener una visión simultánea de los municipios en los que la intensidad de la deforestación se combina con debilidades/fragilidades del territorio, ya sea en el ámbito social, económico, institucional o de seguridad.

Luego, se tiene un segundo bloque de artículos sobre estudios de uso del suelo. El texto de Napoleón Ordoñez Delgado analizó las propiedades físicas y químicas de las diferentes unidades cartográficas de suelos del Centro Agropecuario Marengo, representadas por 15 perfiles modales, con el fin de establecer grupos de manejo, teniendo en cuenta los problemas de drenaje, compactación, salinización, sodicidad y niveles freáticos fluctuantes, definió cuatro grupos de manejo que limitan el desarrollo y productividad de estos suelos y elaboró una serie de recomendaciones para cada uno de los grupos.

Alfonso López Moreno contribuyó con un estudio comparado de metodologías de aptitud de uso del suelo, como una propuesta alternativa. Utilizó la metodología Cervatana Modificada (MCM) en el municipio de Puerto Gaitán – Meta. López decidió estudiar este municipio porque se ubica en la región de la Orinoquía, la cual cuenta con una extensa reserva de recursos, especialmente de tierras aptas para la producción y la conservación por su alta biodiversidad.

La investigación consistió en realizar un análisis comparativo de aptitud del suelo, entre resultados del Instituto Geográfico Agustín Codazzi para 2013 y los obtenidos con la MCM, bajo el enfoque del desarrollo sostenible. Se utilizó información base y temática a escala 1:25,000. Adicionalmente, se manejó el método Delphi y el Análisis Multicriterio. El análisis comparativo arrojó mejores escenarios para la MCM, con un mayor número de clases de clasificación para zonas altamente productivas, como es la S2 para la producción agrícola y zonas específicas para la conservación. La investigación concluye que la hipótesis planteada, del uso de una metodología como la MCM, aprovecha de manera significativa la sinergia, en cuanto a insumos y metodologías utilizadas, para la obtención de escenarios potenciales de uso.

De manera más específica, Laura Alejandra Agudelo Mayorga y Tatiana Santos Bohórquez proponen una *Zonificación agroecológica para el cultivo de café (Coffea arabica L) en el departamento de Santander mediante el método Multicriterio en QGIS*. Para esto, emplean la metodología de Multicriterio AHP, con el propósito de incluir nuevos factores para esta zonificación, dado que la adaptación del cultivo de café cada vez es más incierta debido a la variabilidad climática y fenómenos extremos como el Niño o la Niña. Consideraron criterios como condiciones climáticas, disponibilidad de nutrientes en el suelo, índices espectrales y susceptibilidad fitosanitaria. Asignaron pesos a cada criterio y generaron un mapa de aptitud.

El tercer bloque de artículos está asociado a la geografía del turismo. El primer artículo, *Tensiones en torno a las representaciones y autorrepresentaciones de lo indígena en el Guaviare por la incidencia del turismo*, es una contribución de Sara Stefania Ruiz Sepúlveda, Axel Nicolás Arbeláez Vargas y Michaela Bartmann. Este trabajo es el resultado de una investigación realizada en trabajo de campo de Geografía de la Universidad Nacional de Colombia. Los autores exploraron las tensiones existentes entre las representaciones y autorrepresentaciones de lo indígena, así como los conceptos que fundamentan otras formas de hacer turismo. Usaron una metodología cualitativa con entrevistas semiestructuradas, grupos de discusión y análisis de fotos. Concluyeron que falta mejorar la comunicación entre los diferentes actores en torno al turismo para consolidar esta actividad en algunas comunidades, se debe trabajar para que no se siga perpetuando una imagen prejuiciosa de lo indígena y observaron que las representaciones y autorrepresentaciones divergen significativamente entre las comunidades, los

turistas y el Estado, lo que se convierte en un obstáculo para los pueblos indígenas y para los turistas que los visitan debido a las preconcepciones frente a lo que encuentran y, por tanto, dificultan el desarrollo de un turismo indígena o etnoturismo.

Respecto al trabajo de Anairamiz Aranguren Becerra, Iris M. Díaz Fernández y Elides Aquiles Sulbarán Zambrano, estos plantearon realizar un estudio sobre el estado, valoración y conservación del ecosistema altiandino como consecuencia de la actividad turística y deportiva en una ruta del Parque Nacional Sierra de La Culata en Mérida, Venezuela. Esta investigación fue trabajada desde varias escalas, buscando un nivel detallado. Realizaron una interpretación visual de las variables biofísicas al usar imágenes de satélite y recopilaron información de las visitas en los puestos de control del parque, con el propósito de estimar los cambios en la cobertura vegetal mediante método de valoración directo en campo para medir el porcentaje de cobertura previo a la competencia deportiva (45k) en 20 parcelas de 4 m² distribuidas en un tramo de 12 km paralelas a la ruta. Demostraron cómo el turismo y las actividades deportivas en zonas de alta fragilidad es sometida a una constante perturbación. Proponen medidas cónsonas con los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) para conservar este patrimonio natural de los venezolanos y de la alta montaña.

El último bloque son dos artículos que abordan temas de la geografía urbana y económica con el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG). El primero, *Trazando la evolución de Girardot: un estudio de morfología urbana asociada a ciclos económicos y sociales*, fue realizado por Diego Javier Gómez, Andrés Felipe Pulido Otalora, Juan Sebastián Rodríguez López y Johan Sebastián Yazo Moreno. Estos autores buscaron aportar a los estudios urbanos desde una investigación sobre la morfología urbana de Girardot. La intención fue comprender las variaciones con que se ha transformado el espacio en la ciudad de Girardot en sus dimensiones históricas, sociales y económicas, a través de la periodización de ciclos económicos y sociales. Realizaron un trabajo de campo minucioso y encontraron que la forma urbana contemporánea de Girardot es el resultado de condiciones socioeconómicas coyunturales, pero también de elementos estructurales que se han desarrollado a lo largo de distintas etapas de la ciudad.

El segundo artículo de este bloque es un trabajo realizado por Katherine Santiago y Gloria Yulier Cadena-Montero en un sector de la ciudad de Mérida, Venezuela. Las autoras argumentan la necesidad que surge en el país y la región por aplicar metodologías de la economía regional, la geografía y el marketing para ofrecer soluciones de localización de empresas, adicionando dos aspectos clave: el uso de la tecnología y en escenario de limitación de información. De esta manera, se plantearon, como caso de estudio, diseñar una estrategia de localización de una empresa dedicada a la venta de comida rápida en el sector Milla Central de la ciudad Mérida. Trabajaron desde una perspectiva exploratoria-correlacional con un diseño de campo, haciendo uso del *geomarketing* para la formulación de dicha estrategia, específicamente con el modelo de localización de Huff. Complementaron este modelo con el análisis estadístico de información de las preferencias de los consumidores y calidad de servicios de la competencia. Demostraron que la metodología utilizada es útil para estimar lugares óptimos y que el modelo Huff es adecuado para escenarios con limitaciones de información.

A modo de cierre, deseamos dejar una reflexión sobre este

número que consideramos fructífero por su diversidad temática y cobertura espacial, ya que cada artículo aborda temas que invitan a confirmar que la Geografía es una ciencia para la vida, pues no solo ofrece un marco teórico-epistemológico para reflexionar sobre las relaciones sociales y espaciales, sino que también ofrece una comprensión sobre el mundo en el que vivimos, nos impulsa a actuar con mayor responsabilidad y conciencia frente a los desafíos locales, nacionales y globales.

Este número evidencia la necesidad integrar los conocimientos geográficos en nuestras decisiones cotidianas para fomentar un entendimiento más profundo de los sistemas naturales y sociales que nos afectan. Nos capacita a ser actores más informados y comprometidos, capaces de contribuir a la sostenibilidad y al bienestar colectivo. Invitamos a abrazar a la Geografía como una guía para nuestras vidas para adaptarnos mejor a los cambios y moldear un futuro más equilibrado y justo para todos.

Finalmente, agradecer a los autores por sus contribuciones, por confiar en *Análisis Geográficos* y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi para la divulgación de sus investigaciones. Al equipo editorial y de diseño de la Dirección de Investigación y Prospectiva ¡Mil gracias por su apoyo y dedicación!

Gustavo Marulanda Morales¹
Johan Andrés Avendaño²

¹ Director General del Instituto Geográfico Agustín Codazzi. gustavomarulanda@igac.gov.co.

² Director Técnico de la Dirección de Investigación y Prospectiva y Editor de *Análisis Geográficos*. johan.avendano@igac.gov.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7193-2070>.

Análisis de modelos de regresión logística para la identificación de susceptibilidad a deslizamientos en la cuenca hidrográfica del río Guayuriba, Colombia

Analysis of Logistic Regression Models for the Identification of Landslide Susceptibility. Guayuriba River Basin, Colombia

Edgar Libardo Barahona Cantor¹ 

Resumen

Los deslizamientos son los fenómenos naturales que más pérdidas económicas y de vidas generan en Colombia, afectan la conectividad y economía entre las grandes urbes generando miles de millones en pérdidas, como es el caso del territorio que forma la cuenca hidrográfica del río Guayuriba, afectado constantemente por deslizamientos. Se planteó mapear la susceptibilidad a deslizamientos en esta zona mediante el uso de dos modelos de regresión logística (ModeloDummy y ModeloCon), para probar la efectividad del método bajo diferentes formas de entrenamiento. El mapa de deslizamientos, el preprocesamiento de variables y el modelado de susceptibilidad se realizó usando las plataformas GIS, mientras que el análisis estadístico, entrenamiento y validación de los modelos se realizó en Python. La validación usando curvas ROC presentó una precisión para las predicciones del ModeloCon del 93,2% y 91,7% para el ModeloDummy, mientras que la precisión general (*accuracy*) por medio de matrices de confusión mostro valores de 85,77% para el ModeloCon y 85,03% para el ModeloDummy respectivamente. El estudio demostró la efectividad de la regresión logística para el mapeo de la susceptibilidad a deslizamientos y permitió validar la superioridad de los modelos elaborados a partir de variables continuas frente a modelos elaborados usando variables dummy.

Palabras clave:

amenaza natural, análisis de riesgo, deslizamiento de tierra, regresión logística, sistemas de información geográfica.

Cómo citar

Barahona Cantor, E. L. (2024). Análisis de modelos de regresión logística para la identificación de susceptibilidad a deslizamientos en la cuenca hidrográfica del río Guayuriba, Colombia. *Análisis Geográficos*, 57(1), 8 - 27.

Abstract

Landslides are the natural phenomena that generate more economic losses and loss of life in Colombia, affecting the connectivity and economy between large cities, generating billions in losses, as is the case of the territory that forms the watershed of the Guayuriba river, constantly affected by landslides. In this work, it was proposed to map the landslide susceptibility in the area by using two logistic regression models (Dummy Model and ModelCon), to test the effectiveness of the method under different training methodologies. Landslide mapping, variable preprocessing and susceptibility modeling were performed using GIS platforms, while statistical analysis, training and validation of the models were performed in Python. The validation using ROC curves presented an accuracy for the ModelCon predictions of 93.2% and 91.7% for the DummyModel, while the overall accuracy by means of confusion matrices showed values of 85.77% for the ModelCon and 85.03% for the DummyModel respectively. The study demonstrated the effectiveness of logistic regression for mapping landslide susceptibility and validated the superiority of the models elaborated from continuous variables versus models elaborated using dummy variables.

Keyword:

natural hazard, risk analysis, landslides, logistic regression, geographic information systems.

Introducción

Los deslizamientos son uno de los fenómenos naturales más destructivos, pues causan impactos ambientales, daños a la infraestructura y cuestan vidas humanas. Para el territorio colombiano este fenómeno es uno de los que más afectaciones generan, después de las inundaciones según la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Cepal, 2012).

Un movimiento en masa o proceso de talud es el movimiento hacia fuera y hacia abajo de un talud bajo la influencia de la gravedad, que resulta del fallo de una sección del talud a lo largo de un plano de fractura. Estos pueden ser afectados por diversos estímulos naturales externos como lluvias intensas y/o prolongadas, eventos sísmicos, erupciones volcánicas y deshielo. Estos procesos naturales tienen diferentes nombres como “procesos de ladera”, “procesos de movimiento de masas”, o también como “deslizamientos” (Alcántara, 2000).

La susceptibilidad a los deslizamientos se refiere la propensión de ocurrencia en una zona determinada, en función de las características del terreno, sin tener en cuenta el periodo de retorno, ni la probabilidad de que se produzcan fenómenos de inestabilidad (Soeters y Van Westen, 1996). En general, se trata de una propiedad del terreno que indica lo favorable o desfavorable que son sus condiciones para que se produzcan desprendimientos (Suárez, 2009).

Los mapas de susceptibilidad a los deslizamientos describen las zonas potencialmente propensas a estos mediante el análisis de algunos de los principales factores que contribuyen a su ocurrencia (Basu y Pal, 2017). Estos mapas intentan identificar dónde pueden producirse deslizamientos de tierra en una región determinada basándose en un conjunto de características medioambientales relevantes (Guzzetti et al., 1999).

En el estudio de la susceptibilidad a los deslizamientos, los diferentes enfoques se caracterizan dentro de dos directrices metodológicas principales, denominadas cualitativa y cuantitativa (Aleotti y Chowdhury, 1999; Guzzetti et al., 1999). Los enfoques cualitativos se basan en el juicio del conocimiento experto (Yalcin, 2008; Huang et al., 2015) y el enfoque de la persona o personas que

realizan la evaluación de la susceptibilidad (Aleotti y Chowdhury, 1999), tales métodos son subjetivos y determinan la susceptibilidad de forma heurística, con la definición del nivel de susceptibilidad mediante el uso de términos descriptivos (Reichenbach et al., 2018).

Por otro lado, los enfoques cuantitativos se caracterizan en dos tipos diferentes de métodos: deterministas y probabilísticos (Yalcin, 2008), los cuales se diferencian en la forma en que manejan la incertidumbre, pues los métodos deterministas, a pesar de ser predictivos y precisos, no tienen en cuenta la incertidumbre, mientras que los métodos probabilísticos la incluyen mediante el uso de modelos estadísticos. Estos enfoques se basan en expresiones matemáticas que describen la relación entre los factores condicionantes y los deslizamientos (Yalcin, 2008; Mandal y Mandal, 2018). Generalmente, producen estimaciones numéricas de las probabilidades de ocurrencia de fenómenos de deslizamiento en cualquier zona de riesgo (Guzzetti et al., 1999).

Usualmente, el enfoque y las variables seleccionadas para la identificación de la susceptibilidad del territorio están directamente relacionados con la escala de trabajo (Soeters y Van Westen, 1996), y la fiabilidad de los mapas de susceptibilidad a los deslizamientos depende de la cantidad y calidad de los datos disponibles, la escala del trabajo, la selección de la metodología de análisis y modelización adecuada (Yalcin, 2008).

La regresión logística es una herramienta de amplia utilidad para la evaluación y el mapeo de la susceptibilidad del territorio ante la ocurrencia de deslizamientos, y es uno de los métodos cuantitativos más populares y efectivos (Yilmaz, 2009; Huang et al., 2015).

En este estudio se implementó el método de regresión logística (LR) para mapear la susceptibilidad a deslizamientos dentro de la cuenca hidrográfica del río Guayuriba, territorio que conecta las ciudades de Bogotá y Villavicencio mediante la vía nacional 40 y se ha visto históricamente afectado por la ocurrencia de deslizamientos que restringen la conectividad entre ambas urbes y generan pérdidas económicas millonarias.

Con la implementación del método se buscó generar modelos de susceptibilidad a escala regional, que puedan ser implementados como insumo base en planes de ordenamiento territorial

1. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. elbarahonac@udistrital.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2343-1244>.

y gestión del riesgo, dada su capacidad de proporcionar información crucial sobre las zonas propensas a la ocurrencia de deslizamientos y que pueden generar afectaciones económicas y humanas. La aplicación del método se apoyó en el uso de sistemas de información geográfica (SIG), que permiten la extracción de parámetros morfométricos e hidrológicos que son difíciles de obtener (Yalcin, 2008) y que son de vital importancia para el modelado de susceptibilidad a deslizamientos.

Área de estudio

El área de estudio, la cuenca hidrográfica del río Guayuriba, que fue objeto de análisis se muestra en la Figura 1. Se ubica sobre la cordillera oriental; región andina de Colombia, entre los 342 y 4.415 m.s.n.m., tiene un área territorial de 3.198,97 km² de los cuales 2.483,04 km² correspondientes al 77,6% del área total se encuentran en jurisdicción del departamento de Cundinamarca y los restantes 715,93 km² (22,4%) se encuentran en jurisdicción del departamento de Meta. La precipitación media anual en la cuenca del río Guayuriba presenta valores que varían entre 720 a 5.200 mm/año, presentando las menores acumulaciones en su parte alta, hacia el páramo de Sumapaz y zona nororiental de la cuenca y mayores acumulaciones hacia la zona del piedemonte llanero (Fondo de Adaptación, 2018).

La cuenca del río Guayuriba está conformada por rocas cuyo origen geológico pertenecen a dos estadios de tiempo. El primero se da desde el periodo Ordovícico (485,4 Ma atrás) hasta el periodo Carbonífero (298,9 Ma atrás), durante el Paleozoico. Se caracteriza por la conformación predominante de rocas metamórficas relacionadas con una cuenca de *rift* asociada a la separación entre Norteamérica y Sudamérica (Cooper et al, 1995). En la cuenca estas formaciones se ubican en una franja que recorre de sur a oriente, abarcando parte de los municipios de Guayabetal, Gutiérrez, Quetame y Acacias.

El segundo estadio, data del Cretácico inferior (~145 Ma) hasta el periodo Cuaternario (0,0042 Ma); entre el Mesozoico y Cenozoico, se caracteriza por la formación predominante de rocas sedimentarias producto de procesos regresión y transgresión marina. Estas formaciones predominan en la cuenca y se ubican en dos franjas sobre esta, la primera franja cubre el occidente y norte de la cuenca en los municipios de Une, Ubaque, Chipaque, Choachí, Fomeque, Cáqueza, Fosca, fomeque, La Calera y Guasca. La segunda franja se ubica al suroccidente de la cuenca en los municipios de Acacias y Villavicencio.

Materiales y métodos

Plan de trabajo

El plan de trabajo consta de cuatro etapas principales: la primera etapa fue la adquisición de datos, después se llevó a cabo una etapa de procesamiento y producción de factores (variables), las cuales se generaron en formato ráster con una resolución espacial de tres metros. Posteriormente, usando codificación de Python 3.10, se procesaron las variables de insumo para el entrenamiento y validación de los modelos de regresión logística, así como los análisis de multicolinealidad y la validación del modelo mediante curvas de receptor operativo (ROC), por último, se generó el mapa final de susceptibilidad nuevamente en la plataforma ArcGISPro-3.1 (Figura 2).

Adquisición y preprocesamiento de datos

Se adquirieron imágenes de satélite de alta resolución PlanetScope, así como también información de fuentes oficiales del Instituto geográfico Agustín Codazzi (IGAC), el Servicio Geológico Colombiano (SGC), el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y el Alaska Satellite Facility (ASF). Los datos adquiridos, sus características y uso en la investigación se muestran en la Tabla 1.

Figura 2 - Plan de trabajo

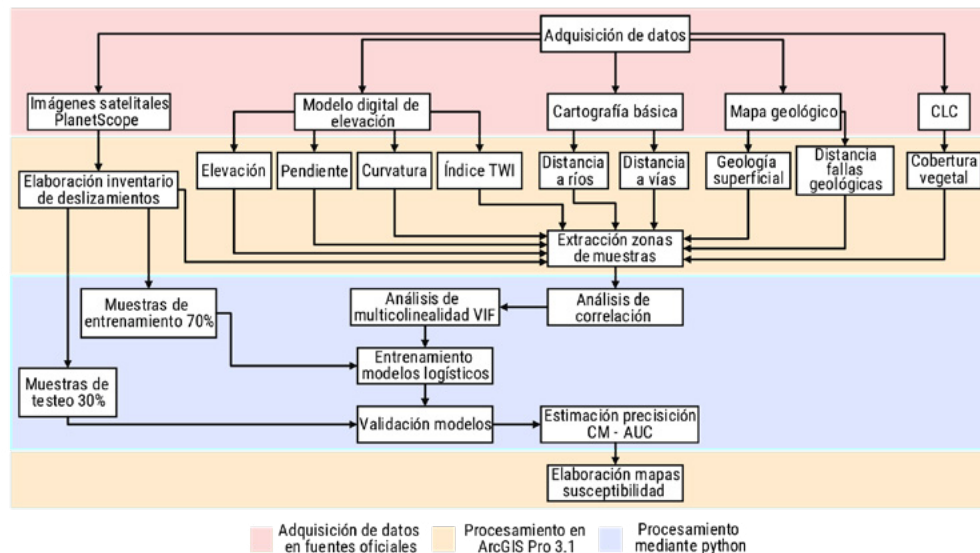
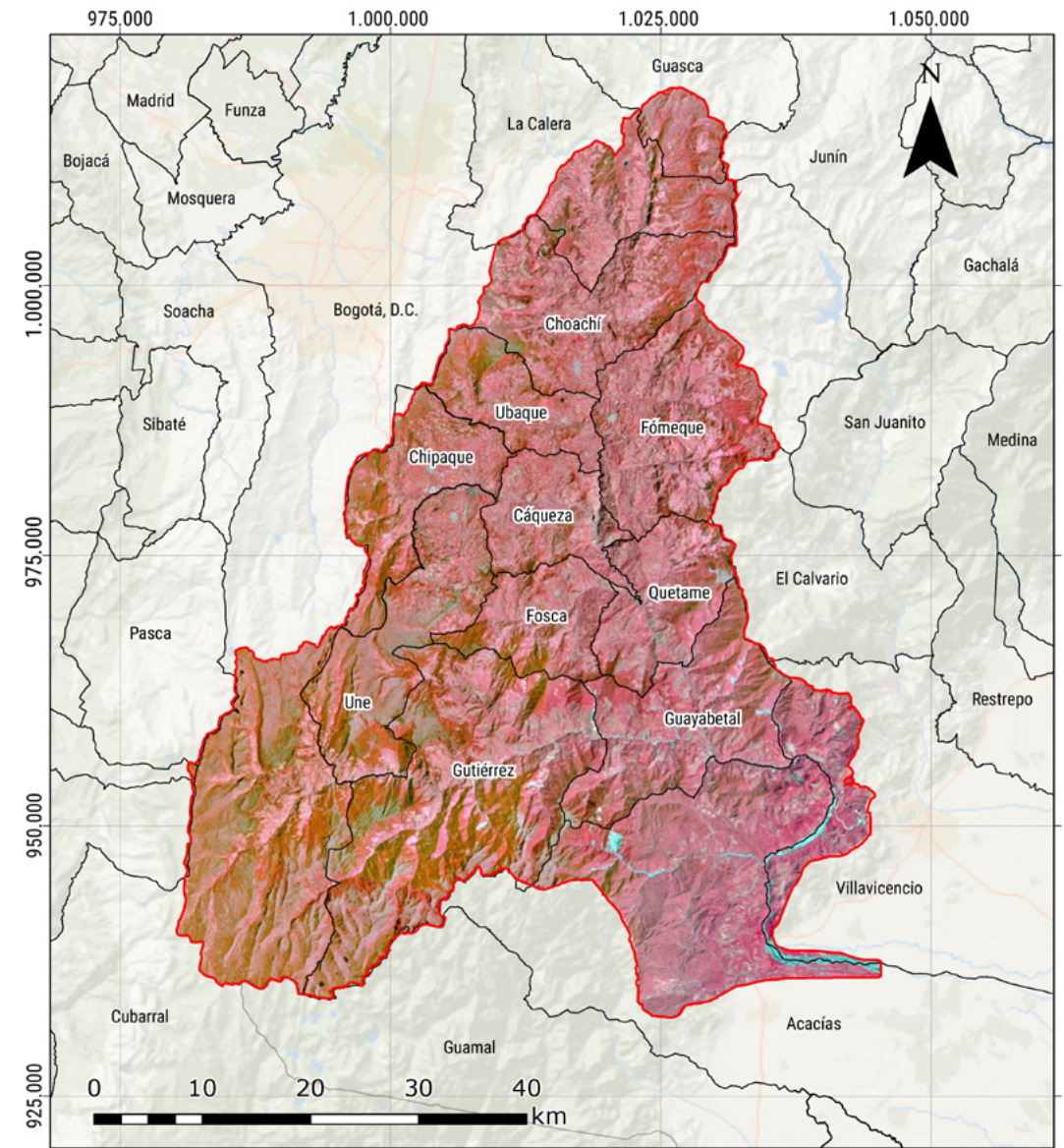


Figura 1 - Ubicación de la cuenca hidrográfica del río Guayuriba



Fuente: elaboración propia a partir de imágenes PlanetScope, 2023.

Tabla 1 - Características de los insumos usados para el modelado de susceptibilidad

Tipo de datos	Plataforma	Resolución espacial o escala	Uso	Fuente
Imágenes satelitales	PlanetScope	3 metros	Inventario deslizamiento	PlanetScope
DEM	STRM resampleado	125 metros	Pendiente/TWI/curvatura/elevación	Alaska Satellite Facility
Cartografía básica	-	1:25.000	Distancia a ríos/distancia a vías	IGAC
Mapa geológico 2020	-	1:100.000	Distancia a fallas geológicas/geología superficial	SGC
CLC 2018 Colombia	-	1:100.000	Cobertura vegetal	IDEAM

Preparación del inventario de deslizamientos

El mapa de inventario de deslizamientos es esencial y es un punto de partida clave para estudiar la relación entre los deslizamientos y los factores condicionantes (Huang et al., 2015). En este estudio, el inventario de deslizamientos fue elaborado a partir de la identificación visual de zonas deslizadas usando como apoyo un mosaico de imágenes PlanetScope, que se elaboró usando 16 imágenes capturadas entre el 26 de enero y el 3 de febrero de 2023, el cual cuenta con 0% de nubosidad y una resolución espacial de tres metros.

Se identificaron en total 1964 zonas deslizadas dentro de la cuenca hidrográfica del río Guayuriba, la mayoría ubicadas en la parte sur oriental de la cuenca, especialmente en los municipios de Gutiérrez, Guayabetal y Acacias. Para complementar el inventario, se capturan 2346 zonas de áreas no deslizadas; estas fueron capturadas usando un rectángulo con un área igual a la media de las zonas de deslizamiento y a una distancia no menor de 200 metros de cualquier zona deslizada con la finalidad de no capturar zonas de no deslizamiento en áreas afectadas por deslizamientos cercanos. La Tabla 2 muestra las estadísticas del inventario de deslizamientos, mientras que la Figura 3 muestra en ejemplo del proceso de captura de deslizamientos.

Figura 3 - Imágenes municipio Guayabetal, a) imagen zonas de deslizamientos, b) polígonos de deslizamientos capturados, c) vista 3D de las zonas deslizadas en ArcGIS Pro



Tabla 2 - Estadísticas de las zonas capturadas de deslizamiento y no deslizamiento identificadas

	Zonas deslizadas	Zonas no deslizadas
Numero de muestras	1964	2346
Suma	968.487 ha	1.148.430 ha
Media	0,490 ha	0,489 ha
Máximo	187,226 ha	0,489 ha
Mínimo	0,0085 ha	0,489 ha

Determinación de factores condicionantes

Factores geomorfológicos

Estos generalmente se derivan de modelos de elevación digital (MDE) y describen las características geomorfológicas del terreno y su influencia en la ocurrencia de deslizamientos. Un factor comúnmente usado para el mapeo de susceptibilidad a deslizamientos es la elevación (Conforti et al., 2014; Huang et al., 2015; Zhao et al., 2019), pues esta controla la variación espacial de las condiciones hidrológicas y la estabilidad de las laderas (Yilmaz, 2009). También se implementó la pendiente del terreno (Figura 4), que es uno de los condicionantes más importantes en la ocurrencia de deslizamientos (Chauhan et al., 2010; Reichenbach et al., 2018), esta presenta una correlación positiva con la probabilidad de ocurrencia de estos (Chen y Li, 2020), dado a que a medida que aumenta la pendiente también aumenta el nivel de esfuerzo cortante inducido por la gravedad sobre los suelos (Dai et al., 2001); es decir, la inestabilidad del suelo y las rocas tiende a aumentar con el incremento de la pendiente (Guillard y Zezere, 2012).

La curvatura del terreno se tuvo en cuenta (Figura 5), dado que realiza una contribución importante en la inestabilidad de la pendiente del terreno (Huang et al., 2015). Este parámetro representa la variación espacial del gradiente de la pendiente del terreno (Trigila et al., 2015), y está relacionado con el flujo de escurrimiento superficial y subsuperficial que converge cuando la pendiente es cóncava y diverge cuando es convexa (Guillard y Zezere, 2012); es decir, que controla la convergencia o divergencia de los escombros y el agua del deslizamiento en la dirección de su movimiento (Huang et al., 2015). Por último, se tuvo en cuenta el índice de humedad topográfica (TWI), este indica el efecto de la topografía sobre la ubicación y el tamaño de las zonas saturadas por efecto de la escorrentía (Conforti et al., 2014; Trigila et al., 2015); vale decir, mide el control topográfico sobre el flujo y la acumulación de aguas subterráneas (Zhou et al., 2020). En general, los

Figura 4 - Factor pendiente del terreno

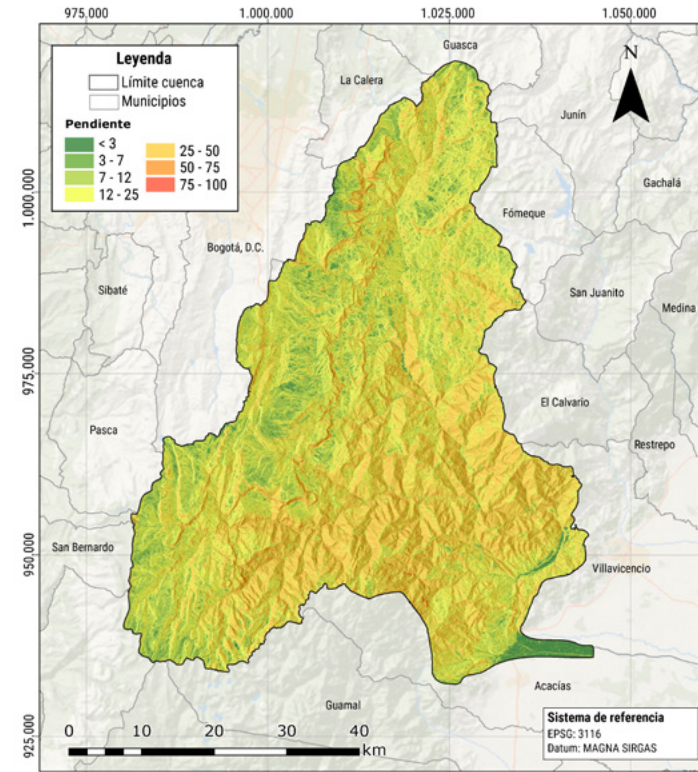
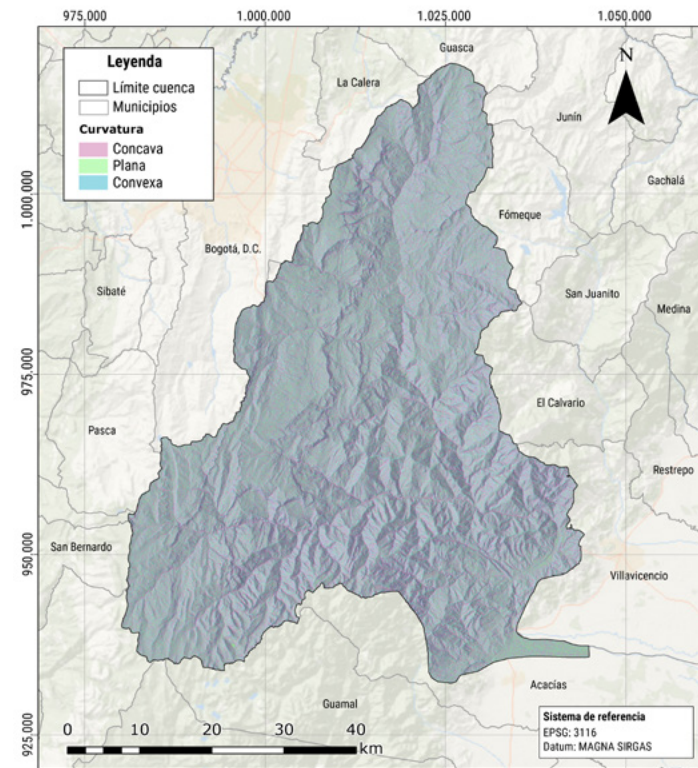


Figura 5 - Factor curvatura



terrenos con valores de TWI más altos tienen más probabilidades de saturarse durante eventos de precipitación (Zhou et al., 2020; Goyez-Peñafiel y Hernández-Rojas, 2021), lo que indica que son más susceptibles a la ocurrencia de deslizamientos.

La elevación (Figura 6), la pendiente, la curvatura y el índice TWI (Figura 7) fueron calculados a partir de un modelo de elevación STRM resampleado a una resolución espacial de 12,5 metros. La elevación se clasificó en cinco rangos usando el método de cortes naturales, el ángulo de la pendiente, se caracterizó según la clasificación de pendientes del IGAC en grupos como sigue <

3°; 3-7°, 7-12°, 12-25°, 25-50°, 50-75°, 75-100°, la curvatura se definió en tres clases distintas; cóncava (< 0), plana (= 0) y convexa (> 0). Por otra parte, el índice de humedad topográfica se clasificó en cinco rangos como sigue 0,18-4,33; 4,33-5,80; 5,80-7,55; 7,55-10,04; 10,04-23,66. Los cálculos anteriores se realizaron usando los geoprocursos disponibles en la plataforma ARCGIS Pro-3.1.

Factores obtenidos a partir del análisis de distancias
Este tipo de factores buscan medir la influencia de un elemento natural o antrópico en la ocurrencia de un deslizamiento en función de su distancia. En este estudio se tuvieron en cuenta tres factores:

Figura 6 - Factor elevación

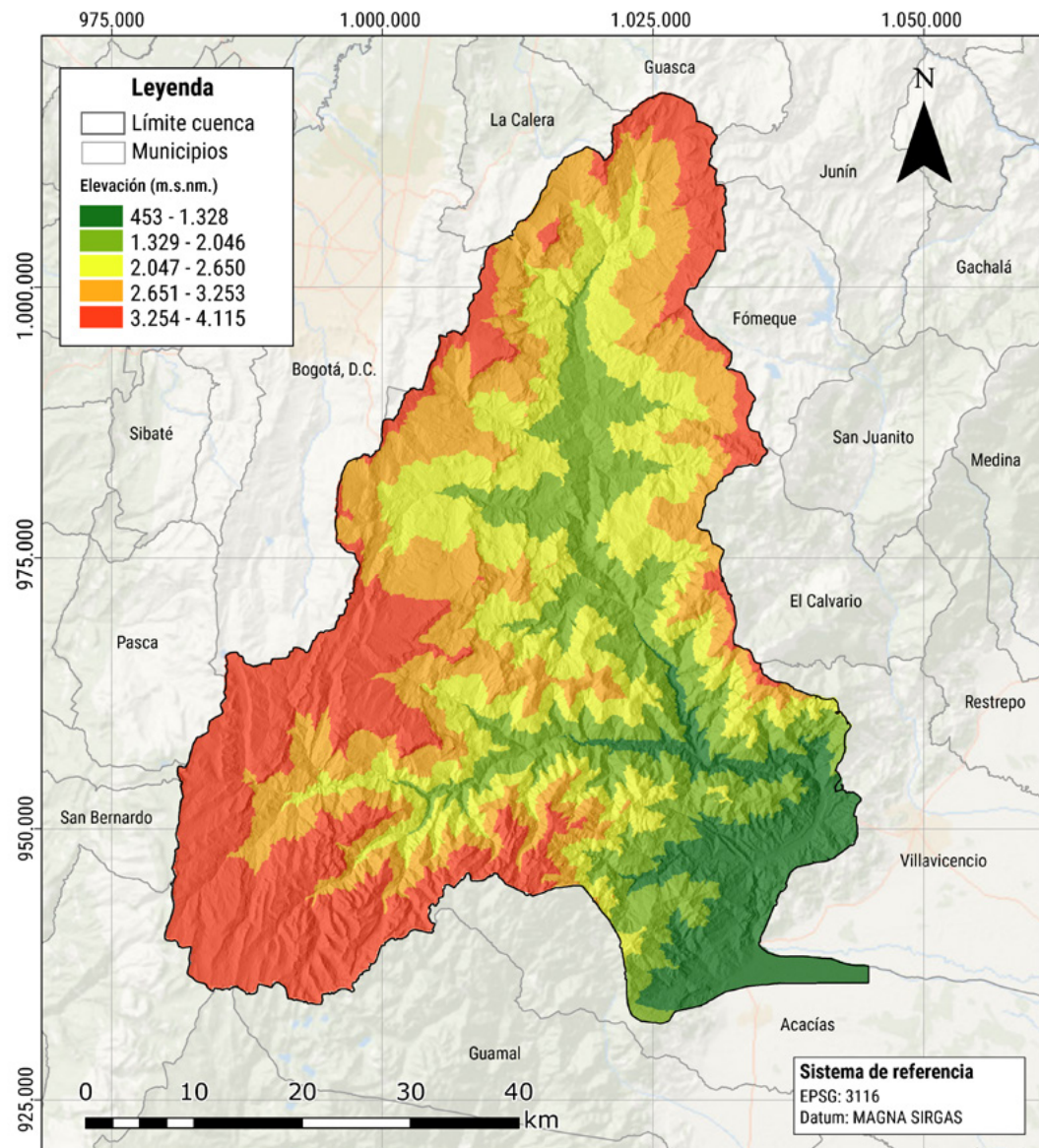
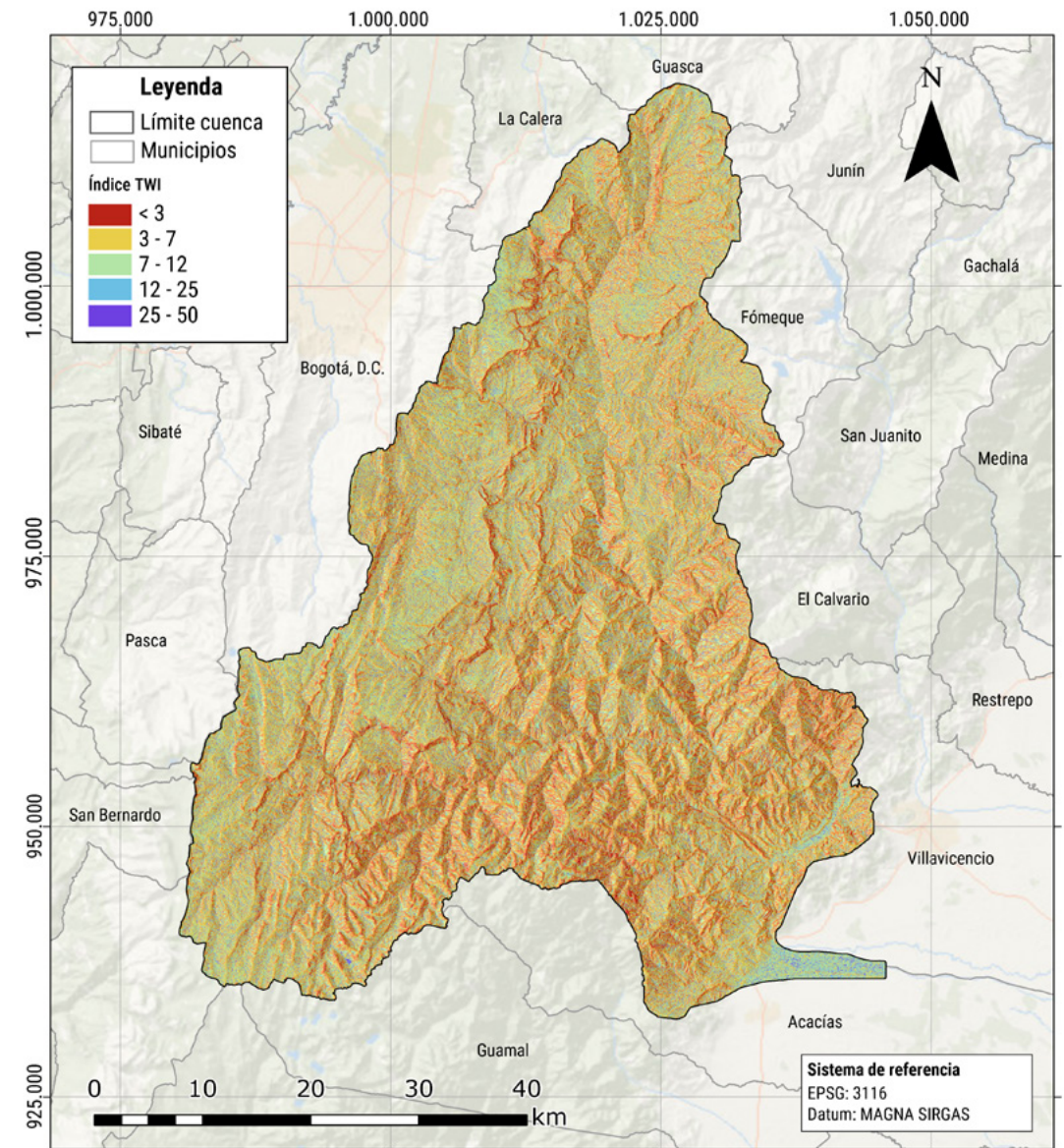


Figura 7 - Factor índice TWI



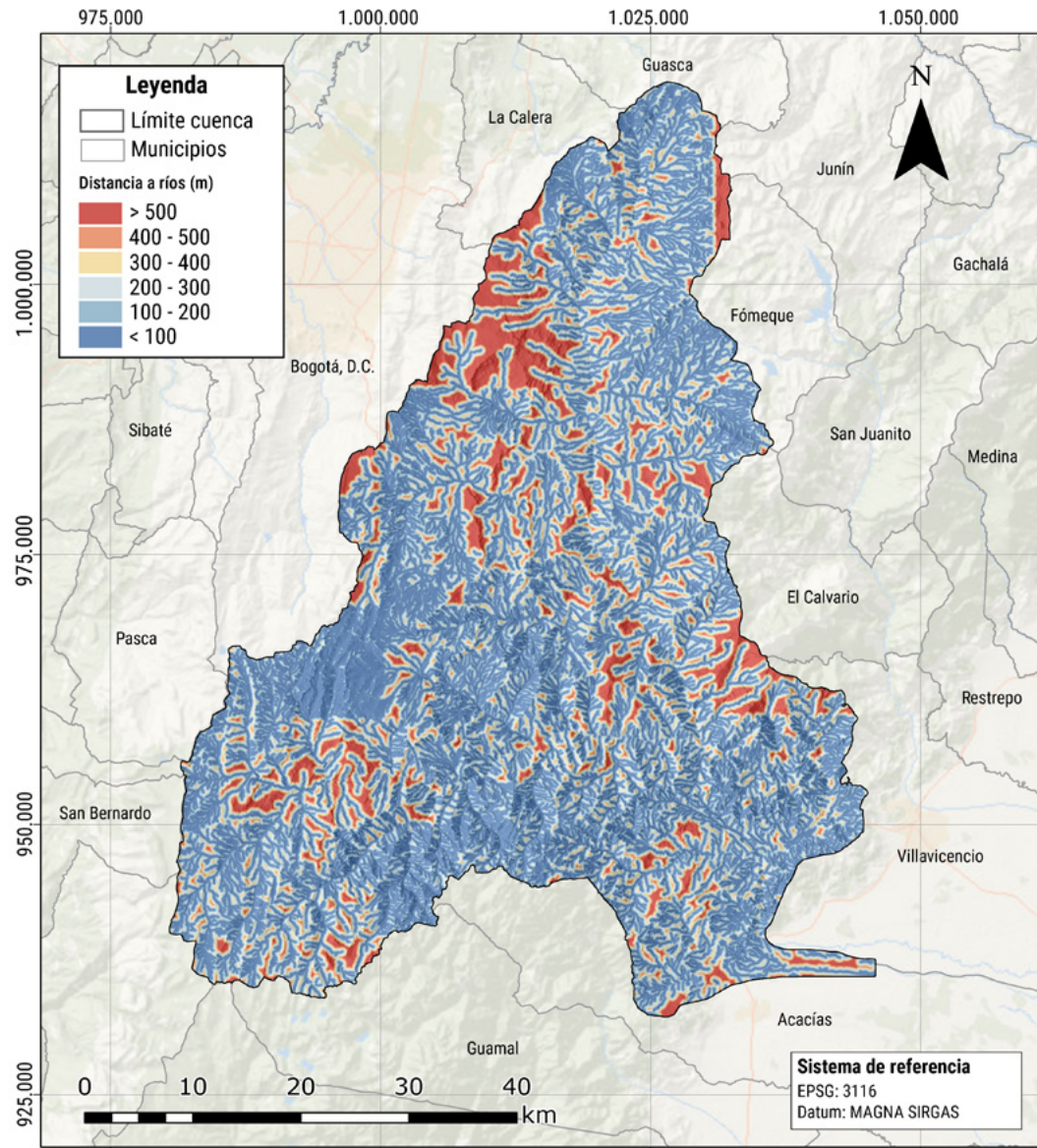
El primero es la distancia a los ríos, se sabe que deslizamientos en zonas montañosas también pueden producirse debido a la actividad erosiva asociada a los drenajes (Chauhan et al., 2010), ello debido a que la inestabilidad de las laderas se ve afectada por la erosión de los ríos que satura y socaba la base de estas (Dai et al., 2001). La distancia a los drenajes capta las condiciones hidrogeológicas relevantes menos favorables para la estabilidad de las laderas debido a la concentración del flujo de agua subterránea, y al efecto desestabilizador de la incisión del río (Reichenbach et al., 2018), por lo que se considera un factor de control en los

deslizamientos causados por la lluvia (Huang et al., 2015) (Figura 8).

El segundo es la distancia a fallas geológicas, estas producen una zona de debilidad de varios metros a cada lado y en el caso de las fallas de gran magnitud, de varios cientos de metros (Suárez, 2009), estas discontinuidades estructurales forman líneas de debilidad en las rocas que tienen probabilidad de ser áreas con alta permeabilidad, erosión profunda y una incidencia particularmente alta de pendientes inestables (Conforti et al., 2014) (Figura 9).

El tercero es la distancia a las vías, estas suelen ser sitios de inestabilidad inducida antropológicamente que, dependiendo

Figura 8 - Factor de distancia a los ríos/drenajes



de su ubicación en las montañas, generalmente sirve como fuente de deslizamientos (Ayalew y Yamagishi, 2005), estas cambian la topografía provocando un aumento de tensión en la base de la pendiente y la generación de grietas sobre esta (Zhou et al., 2020). A menudo, las vías en zonas de pendiente pronunciada como los sistemas montañosos se relacionan con la ocurrencia de deslizamientos y erosión (Mauri et al., 2022), y en general la distancia a estas suele tener gran influencia en la ocurrencia de deslizamientos (Chen y Li, 2020) (Figura 10). La distancia a los ríos, fallas geológicas y vías fue calculada por medio de factores de amortiguamiento o zonas de influencia y

organizada en cinco clases. Para la distancia a los ríos, zonas que varían en intervalos de cien metros entre 0-500 metros, la distancia a las fallas geológicas se definió en intervalos de 200 metros entre cero a mil metros, por último, la distancia a las fallas geológicas se catalogó en intervalos de 300 metros entre 0-1500 metros.

Factor de cobertura de la tierra

Este factor representa un papel importante en la ocurrencia de deslizamientos ya que la vegetación condiciona la resistencia natural que presentan los suelos ante los deslizamientos, esta aporta efectos mecánicos e hidrológicos que proporcionan esta

Figura 9 - Factor distancia a fallas geológicas

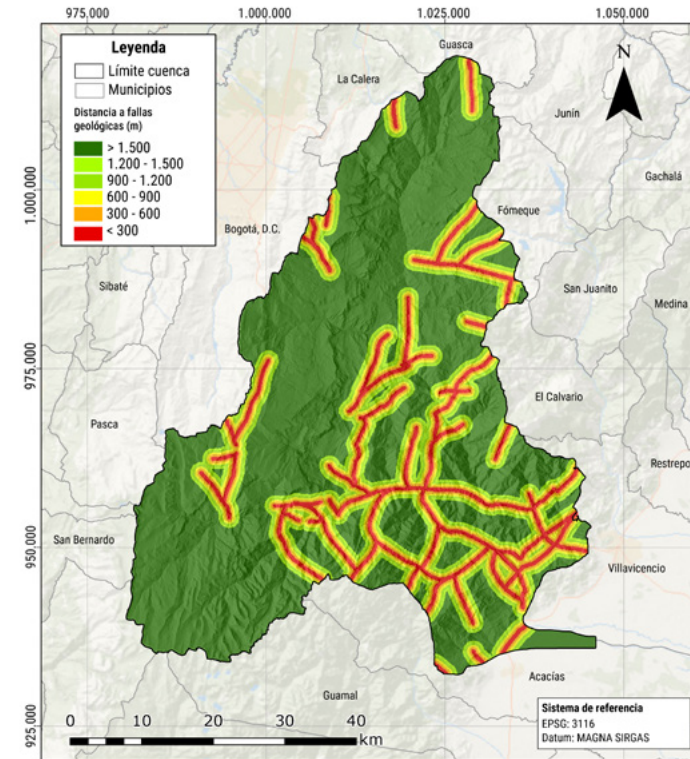
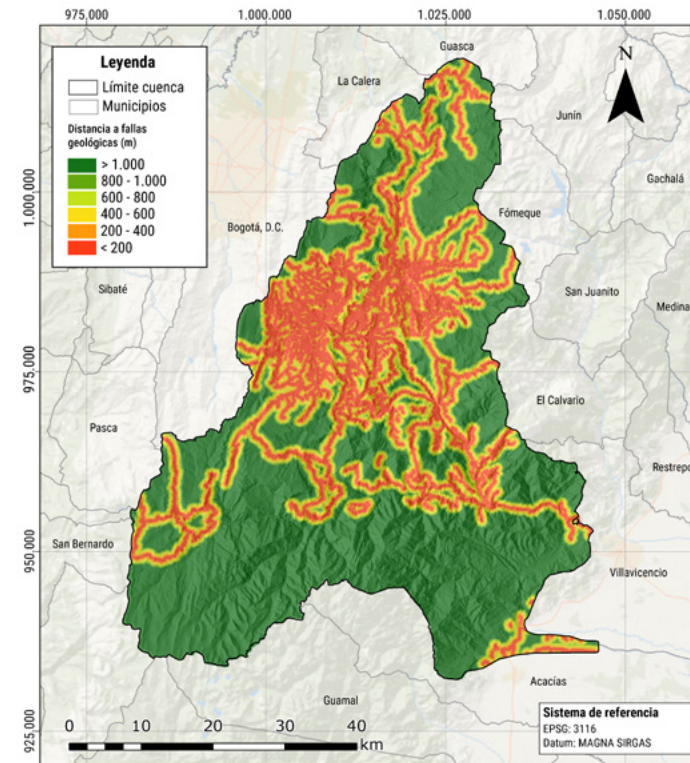


Figura 10 - Factor distancia a las vías



bilidad estructural en suelos con alto grado de pendiente (Huang et al., 2015), cuando es de raíces profundas proporciona resistencia cohesiva a las capas del suelo, facilitando el drenaje subterráneo y reduciendo la posibilidad de deslizamientos superficiales (Suárez, 2001) y aumentando la resistencia del suelo al cizallamiento (Trigila et al., 2015). Por el contrario, las zonas desérticas o en barbecho tienden a desestabilizar el terreno (Chauhan et al., 2010). En este caso, la cobertura del vegetal se representó por medio del mapa de coberturas Corine Land Cover Nivel 2 para Colombia elaborado en el año 2018 por del IDEAM. (Figura 11).

Factor de litología

Este factor mide el grado de influencia de los materiales, sedimentos y rocas en la generación de deslizamientos (Quesada y Feoli-Boraschi, 2018). La litología juega un papel fundamental en la distribución de los deslizamientos y se correlaciona con

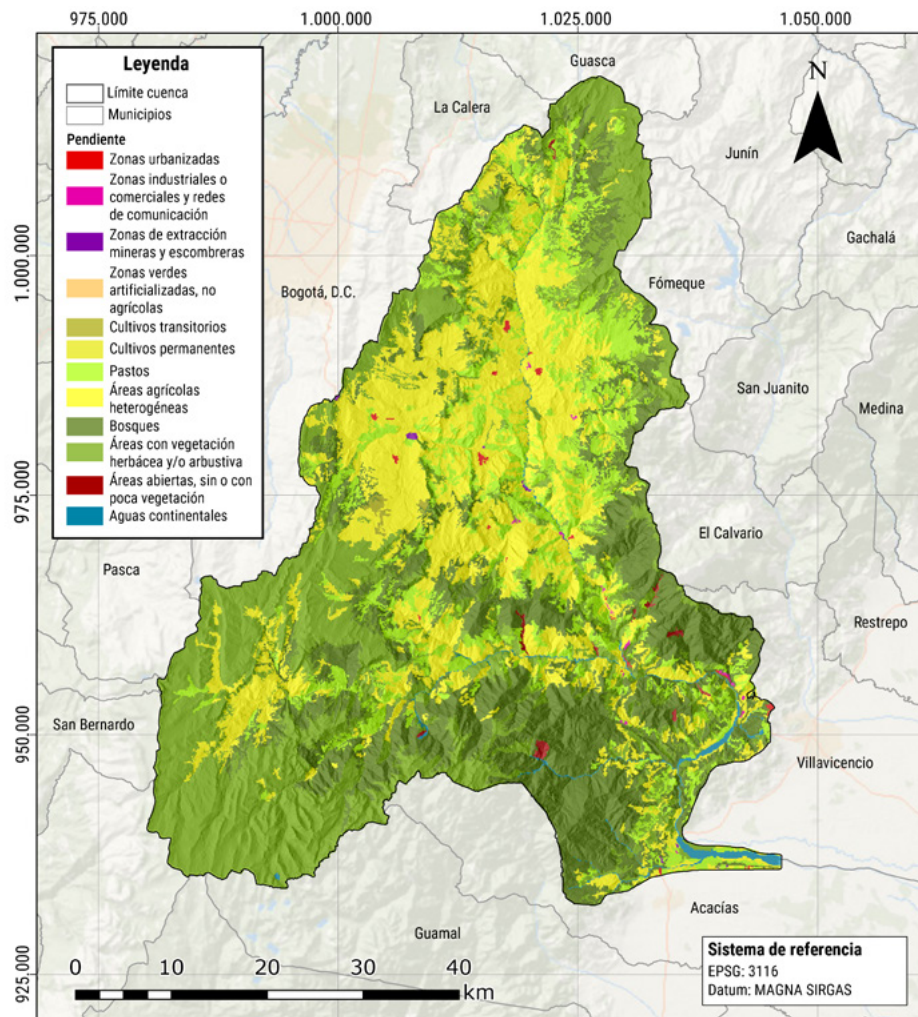
las propiedades del suelo como la resistencia y la estructura de las rocas (Bai et al., 2014), esta influye en gran medida en la ocurrencia de deslizamientos de tierra, porque las variaciones litológicas y estructurales a menudo conducen a una diferencia en la resistencia y la permeabilidad de las rocas y los suelos (Ayalew y Yamagishi, 2005; Chauhan et al., 2010), por lo tanto, es factible hacer inferencias sobre la ocurrencia de deslizamientos mediante el análisis de las características litológica, dado que la naturaleza y la velocidad de los procesos de deslizamiento dependen tanto de la litología como de las características de los materiales subyacentes (Dai et al., 2001). El factor de litología fue elaborado usando las unidades cronoestratigráficas presentes del mapa geológico de Colombia 2018, que describe la edad y el componente litológico de las rocas en la zona de estudios (Figura 12). Los diferentes factores elaborados fueron convertidos a formato ráster con una resolución de 3x3 metros, y sobre

estos se extrajeron los pixeles al interior de las zonas del inventario de deslizamientos, generando una nueva capa ráster que únicamente contiene información en las zonas extraídas y que será implementada como variables de entrenamiento.

Modelado de susceptibilidad mediante regresión logística
La regresión logística es el método estadístico cuantitativo más

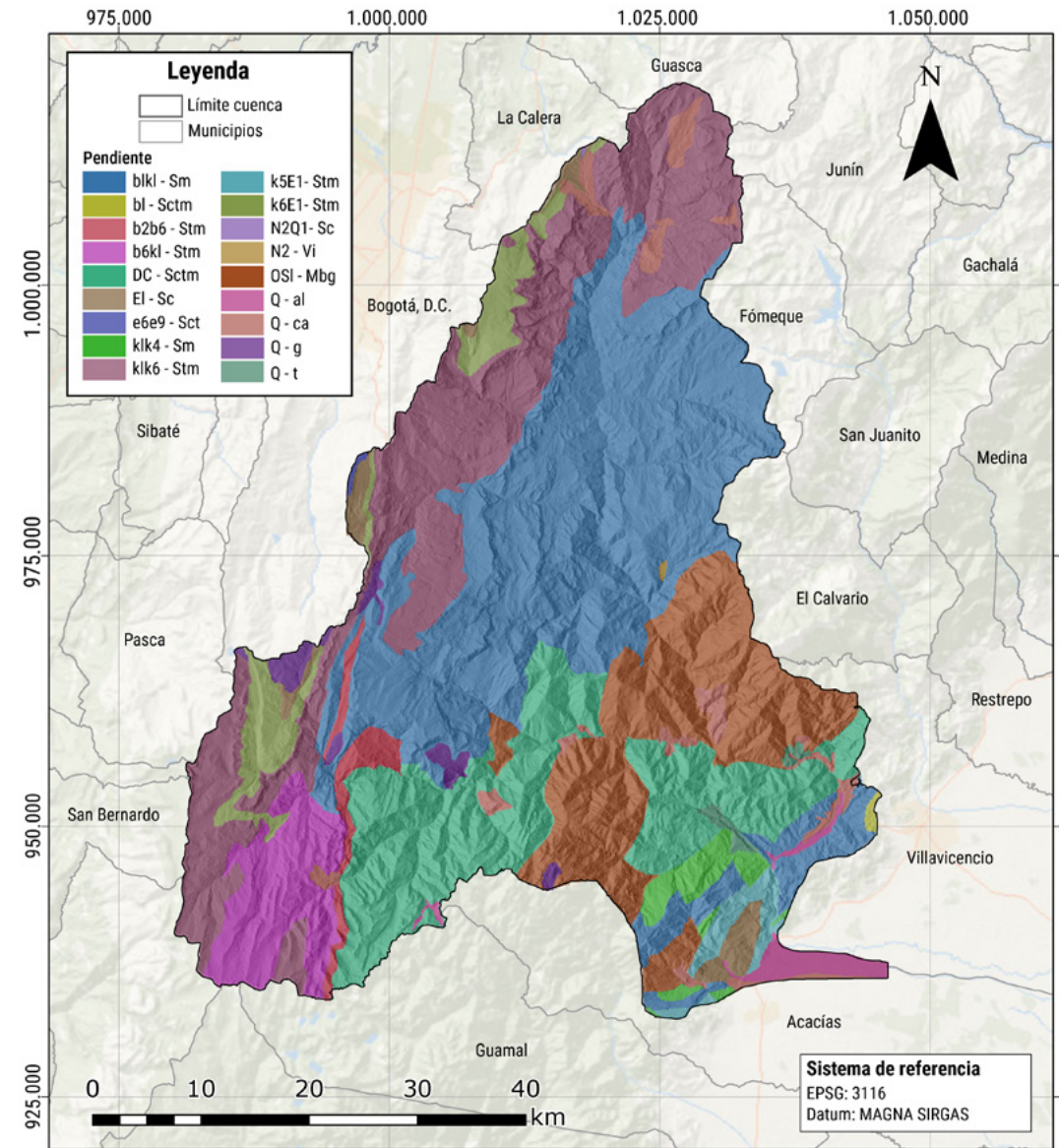
ampliamente utilizado para el análisis de susceptibilidad a deslizamientos (Huang et al., 2015; Goyez-Peñafiel y Hernández-Rojas, 2021), su objetivo es encontrar el modelo adecuado para describir la asociación entre la presencia de deslizamientos (variable dependiente) y un conjunto de parámetros independientes (Ayalew y Yamagishi, 2005), mediante la creación de una relación de regresión multivariante entre estas (Zhao et al., 2019). La regresión logística

Figura 11 - Factor de cobertura de la tierra



Fuente: elaboración propia a partir de datos del IDEAM, 2018.

Figura 12 - Factor de litología



modela la ocurrencia de deslizamientos mediante una variable dicotómica en la que los valores 0 y 1 representan ocurrencia y no ocurrencia de deslizamientos respectivamente. La probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento puede definirse por la ecuación 1:

$$P(y=1) = \frac{1}{1+e^{-z}} \quad 1$$

Donde P es la probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento, valor que varía entre 0 y 1. Z por su parte, es una combinación lineal de las variables independientes x_i , los coeficientes de regresión β_i y el intercepto o también llamado sesgo β_0 (Goyez-Peñaflor y Hernández-Rojas, 2021). Esta representa la presencia o ausencia de deslizamientos (condicionales actuales) en las variables independientes (condiciones previas al deslizamiento) (Bai S. et al., 2014), y se define por la siguiente ecuación (2):

$$Z = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \dots + \beta_n x_n \quad 2$$

La relación entre P y Z puede ser expresada usando la ecuación 3 (Huang et al., 2015):

$$\text{logit}(P) = \ln\left(\frac{P}{1-P}\right) = Z \quad 3$$

Donde $P/(1-P)$ se conoce como odds *ratio*. En esta investigación para la identificación de la susceptibilidad a los deslizamientos se definieron dos modelos de regresión logística. El primero (ModeloDummy) enfocado a medir el rendimiento del método usando variables continuas y variables dummy² el segundo (ModeloCon) está orientado a medir el rendimiento del método únicamente usando variables continuas. Para ello se elaboró una *script* en un entorno de Python 3.10, donde los archivos *raster* que representan las zonas de muestras de entrenamiento fueron convertidos a vectores planos usando la librería GDAL, para después ser alojados en *dataset* como vectores columnas, en el que se codificaron sus clases y eliminaron datos nulos en los casos. El *dataset* final cuenta con un total de 2.191.775 registros y 35 columnas.

Análisis de multicolinealidad

Un problema en el ajuste de modelos de regresión logística es la sensibilidad del método a la presencia de colinealidad entre variables independientes (Hosmer y Lameshow, 2000), lo que hace necesario usar métricas que permitan su identificación. Las medidas más comunes para evaluar la multicolinealidad son el valor de tolerancia (TOL) y el factor de inflación de la varianza (VIF) las cuales miden el grado en el que cada variable independiente se explica por otras variables independientes (Hair et al., 1999). En este caso, a pesar de que no existe una regla que defina como deben ser interpretados los VIF, en este estudio se definió el umbral de corte en un valor de VIF > 2 y Tol < 0.4, el cual ha sido empleado en múltiples ocasiones la definición de multicolinealidad (Bai S. et al., 2010; Bai S. et al., 2014).

Usando el *dataset* elaborado con anterioridad, se calcularon los valores de los factores de inflación de varianza (VIF) y tolerancia (TOL) para las de variables de cada modelo, con lo que se identifica que no es necesario remover variable por problemas

relacionados con multicolinealidad. El cálculo de los valores VIF, TOL y el tipo de variable usada para el entrenamiento de los modelos se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3 - Resultado del análisis de multicolinealidad para las variables de los modelos en entrenamiento

Variable	ModeloDummy		ModeloCon		Tipo
	VIF	TOL	VIF	TOL	
Distancia a ríos	1,0968	0,9118	1,0485	0,9537	Continua
Distancia a fallas geológicas	2,0768	0,4815	1,5215	0,6572	Continua
Pendiente del terreno	1,7658	0,5663	1,6488	0,6064	Continua
Curvatura	1,0689	0,9356	1,0676	0,9366	Continua
TWI	1,2294	0,8134	1,2211	0,8188	Continua
Elevación	2,2366	0,4471	1,6422	0,6089	Continua
Distancia a las vías	1,8704	0,5346	1,5188	0,6584	Continua
Densidad deslizamiento litología	-	-	2,2890	0,4368	Continua
Densidad deslizamiento CLC	-	-	1,4798	0,6757	Continua
Lito_DC-Sctm	1,5057	0,6641	-	-	Dummy
Lito_EI-Sc	1,1326	0,8829	-	-	Dummy
Lito_N2-Vi	1,0035	0,9965	-	-	Dummy
Lito_Q-al	1,2146	0,8233	-	-	Dummy
Lito_Q-ca	1,1808	0,8469	-	-	Dummy
Lito_Q-g	1,0651	0,9389	-	-	Dummy
Lito_Q-t	1,0691	0,9354	-	-	Dummy
Lito_b1-Sctm	1,4379	0,6955	-	-	Dummy
Lito_b1k1-Sm	2,1871	0,4572	-	-	Dummy
Lito_b2b6-Stm	1,0542	0,9486	-	-	Dummy
Lito_b6k1-Sm	1,5990	0,6254	-	-	Dummy
Lito_e6e9-Sct	1,0113	0,9888	-	-	Dummy
Lito_k1k4-Sm	1,1449	0,8734	-	-	Dummy
Lito_k1k6-Stm	2,4854	0,4023	-	-	Dummy
Lito_k5E1-Stm	1,1072	0,9032	-	-	Dummy
Lito_k6E1-Stm	1,3051	0,7662	-	-	Dummy
CLC_1.1 Zonas urbanizadas	1,0196	0,9807	-	-	Dummy
CLC_1.2 Zonas industriales o comerciales	1,0221	0,9783	-	-	Dummy
CLC_1.3 Zonas de extracción mineras y...	1,0113	0,9888	-	-	Dummy
CLC_2.1 Cultivos transitorios	1,0084	0,9917	-	-	Dummy
CLC_2.2 Cultivos permanentes	1,0301	0,9708	-	-	Dummy
CLC_2.3 Pastos	1,6222	0,6165	-	-	Dummy
CLC_2.4 Áreas agrícolas heterogéneas	1,8452	0,5420	-	-	Dummy
CLC_3.2 Áreas con vegetación herbácea...	1,7777	0,5625	-	-	Dummy
CLC_3.3 Áreas abiertas, sin o con poca...	1,5135	0,6607	-	-	Dummy
CLC_5.1 Aguas continentales	1,4919	0,6703	-	-	Dummy

Entrenamiento de los modelos de regresión logística

El *dataset* de variables se dividió en dos grupos: un *dataset* de entrenamiento y un *dataset* de prueba, los cuales contienen el 70% y 30% del total de los datos respectivamente. El primer modelo (ModeloDummy) se entrenó usando como independientes variables categorizadas y variables dummy elaboradas a partir de los factores de cobertura de la tierra y litología, mediante un proceso de codificación *one-hot*, partir del cálculo donde cada categoría de la variable categórica se representa por un vector de *bits* (uno y cero). Por otra parte, el segundo modelo (ModeloCon) se entrenó usando como insumos únicamente variables continas y categorizadas, las últimas elaboradas a partir del cálculo de densidad de área deslizada por categoría para las variables de

cobertura de la tierra y litología.

Los modelos se entrenaron usando la librería Statsmodels-v1.24.0 que ofrece herramienta orientadas al entrenamiento de modelos de regresión lineal múltiple. El proceso de entrenamiento de cada modelo consistió en una primera etapa de ajuste usando todas las variables, sobre este se verificó la significancia estadística de cada variable, para finalmente ajustar el modelo con las variables significativas. Con los modelos entrenados, se probó cada uno usando los datos disponibles en el *dataset* de prueba, ello para validar el rendimiento de las predicciones realizadas con los modelos mencionados.

La Tabla 4 muestra el resultado del entrenamiento de los parámetros asociados a cada variable usada en los modelos planteados, de las variables implementadas originalmente en ModeloDummy siete fueron eliminadas por no ser estadísticamente representativas. De forma somera el valor del Pseudo R2 indica que el ModeloCon ajusto los datos de entrenamiento de mejor forma que y con un número menor de iteraciones que el ModeloDummy.

Tabla 4 - Resultados de la estimación de pesos para el modelo de susceptibilidad por medio de los modelos planteados

Modelo Entrenado	ModeloDummy	ModeloCon
Parámetros	Estimado	Estimado
Distancia a ríos	0,4286	0,4811
Distancia a fallas geológicas	0,2138	0,2020
Pendiente del terreno	0,8185	0,7505
Curvatura	-0,0932	-0,1055
TWI	0,0603	0,0582
Elevación	-0,4569	-0,2257
Distancia a las vías	-0,2342	-0,0548
Densidad deslizamiento litología		0,9398
Densidad deslizamiento CLC		0,8515
Lito_DC-Sctm	-0,8189	
Lito_EI-Sc	-1,0770	
Lito_N2-Vi	-2,2013	
Lito_Q-al	-5,2254	
Lito_Q-ca	-0,5486	
Lito_Q-g	-3,8445	
Lito_Q-t	-0,2177	
Lito_b1k1-Sm	-2,6918	
Lito_b2b6-Stm	-3,1485	
Lito_b6k1-Sm	-1,5880	
Lito_k1k4-Sm	-3,1132	
Lito_k1k6-Stm	-3,6790	
Lito_k5E1-Stm	-1,9172	
Lito_k6E1-Stm	-2,4610	
CLC_1.2 Zonas industriales o comerciales y redes de ...	-0,7764	
CLC_1.3 Zonas de extracción mineras y escombreras	3,7575	
CLC_2.3 Pastos	0,0666	
CLC_3.2 Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	0,5107	
Intercepto	-2,9179	-10,1004
Numero de iteraciones	213	7
Pseudo R2	0,4849	0,5261

Validación de los modelos de regresión logística

Para validar la precisión de los modelos entrenados, se utilizó la curva de características operativas del receptor ROC por sus siglas en inglés, esta es una técnica para visualizar, organizar y seleccionar

clasificadores en función de su rendimiento (Fawcett, 2006). Generalmente se utiliza para cuantificar la precisión de los modelos de susceptibilidad a deslizamientos (Bai et al., 2014; Chauhan et al., 2010; Guillard y Zezere, 2012; Basu y Pal, 2017; Vakhshoori et al., 2019).

El área bajo la curva ROC o AUC por sus siglas en inglés, se usa como una métrica escalar que representa el rendimiento de los modelos (Fawcett, 2006), el cálculo de la curva ROC se basa en la construcción de un número definido de umbrales donde se identifican los valores asociados a la sensibilidad y especificidad, que en este caso vienen definidos por la ecuación 4 y ecuación 5 (Vakhshoori et al., 2019):

$$\text{Sensibilidad} = \frac{L_{>i}}{T_L} \quad 4$$

$$\text{Especificidad} = \frac{S_{>i}}{T_S} \quad 5$$

Donde L_i es el número de píxeles de deslizamiento con un valor superior al umbral, y S_i es el número de píxeles estables con un valor inferior al umbral. T_L y T_S son el número total de píxeles de deslizamiento y píxeles estables respectivamente. La curva ROC se crea al graficar los valores de *sensibilidad* y de *especificidad* para cada umbral definido en el eje x y en el eje y respectivamente, el valor del AUC para la curva se calcula mediante la ecuación 5 (Guillard y Zezere, 2012; Vakhshoori et al., 2019):

$$AUC = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{1}{2} \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2} \cdot (y_i + y_{i+1}) \quad 6$$

Donde x_i y y_i son los umbrales definidos. Adicional para cada modelo se calculó la matriz de confusión, la cual permite comparar las observaciones realizadas en el inventario de deslizamiento con las predicciones realizadas por los modelos (Aristizabal et al., 2019), con lo que es posible hacer inferencias sobre la exactitud de los modelos planteados.

Resultados

Resultados modelos de regresión logística

La Figura 13 muestra las curvas ROC calculadas para estimar la precisión de las predicciones para el ModeloDummy y el ModeloCon. El valor de AUC para el primero es igual a 0,91730 que corresponde a una precisión del 91,73% en las predicciones realizadas con este, por otra parte, el segundo modelo tiene un AUC de 0,93280, mostrando una precisión en las predicciones realizadas del 93,28%.

Por otra parte, los valores de verdaderos positivos (TP) y de verdaderos negativos (TN) que se muestran en la matriz de confusión de la Figura 14 indican que el ModeloDummy clasificó de forma adecuada el 43,5% de los píxeles como zonas de deslizamiento y el 41,5% como zonas de no deslizamiento, indicando con ello una exactitud del 85,03% para las predicciones del modelo, los valores de los falsos positivos (FP) y falsos negativos (FN) aunque bajos, indican que el modelo tiende sobre estimar las zonas de deslizamiento en el 9,4% de los casos mientras que sobre estima las zonas de no deslizamiento el 5,6% de los casos.

En cuanto al ModeloCon, los valores de falsos positivos (FP) y falsos negativos (FN) en la Figura 13c muestran la tendencia de

2. Las cuales son variables binarias usadas para representar una categoría determinada.

Figura 13 - Curvas ROC calculadas para estimar la precisión de las mediciones

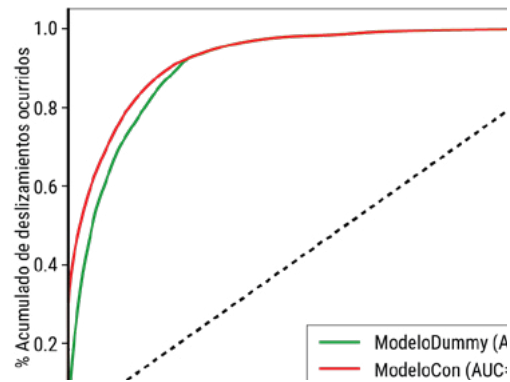
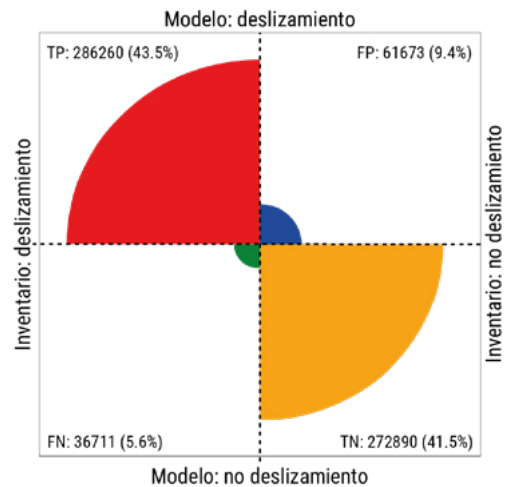


Figura 14 - Matriz de confusión ModeloDummy

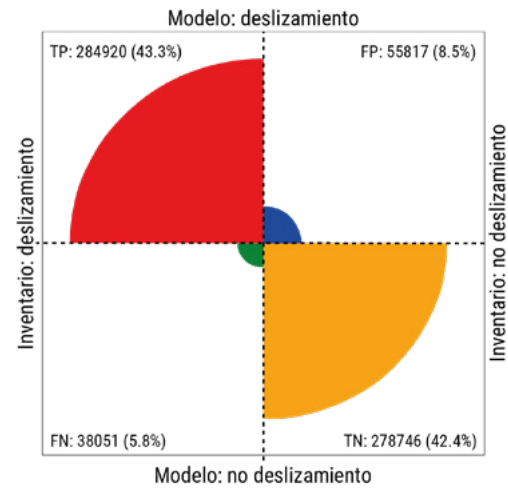


este a sobreestimar las zonas no deslizadas y deslizadas en el 5,8% y 8,5% de los casos respectivamente, el valor de verdaderos positivos (TP) y verdaderos negativos (TN) indican que el modelo clasificó de forma adecuada el 43,4% de los píxeles como zonas de deslizamiento y el 42,4% como zonas de no deslizamiento, mostrando una precisión en las predicciones del 85,77% (Figura 15).

Resultado de los mapas de susceptibilidad

Una vez entrenados los modelos y evaluada su capacidad de predicción, el siguiente paso consistió en la elaboración de los mapas de susceptibilidad a deslizamientos. Un aspecto a tener en cuenta es la necesidad de clasificación del nivel susceptibilidad definida para cada uno de los mapas, la cual varía entre 0 a 1. En este caso se caracterizó la susceptibilidad en cinco rangos iguales, según se muestra en la Tabla 5, para el proceso de creación de los mapas de susceptibilidad se usaron geoprocesos de las herramientas de la plataforma ArcGIS Pro-3.1.

Figura 15 - Matriz de confusión ModeloCon



Probabilidad	Grado de susceptibilidad
0,0-0,2	Muy bajo
0,2-0,4	Bajo

Tabla 5 - Clasificación de susceptibilidad de los valores de probabilidad estimados por modelos de regresión logística

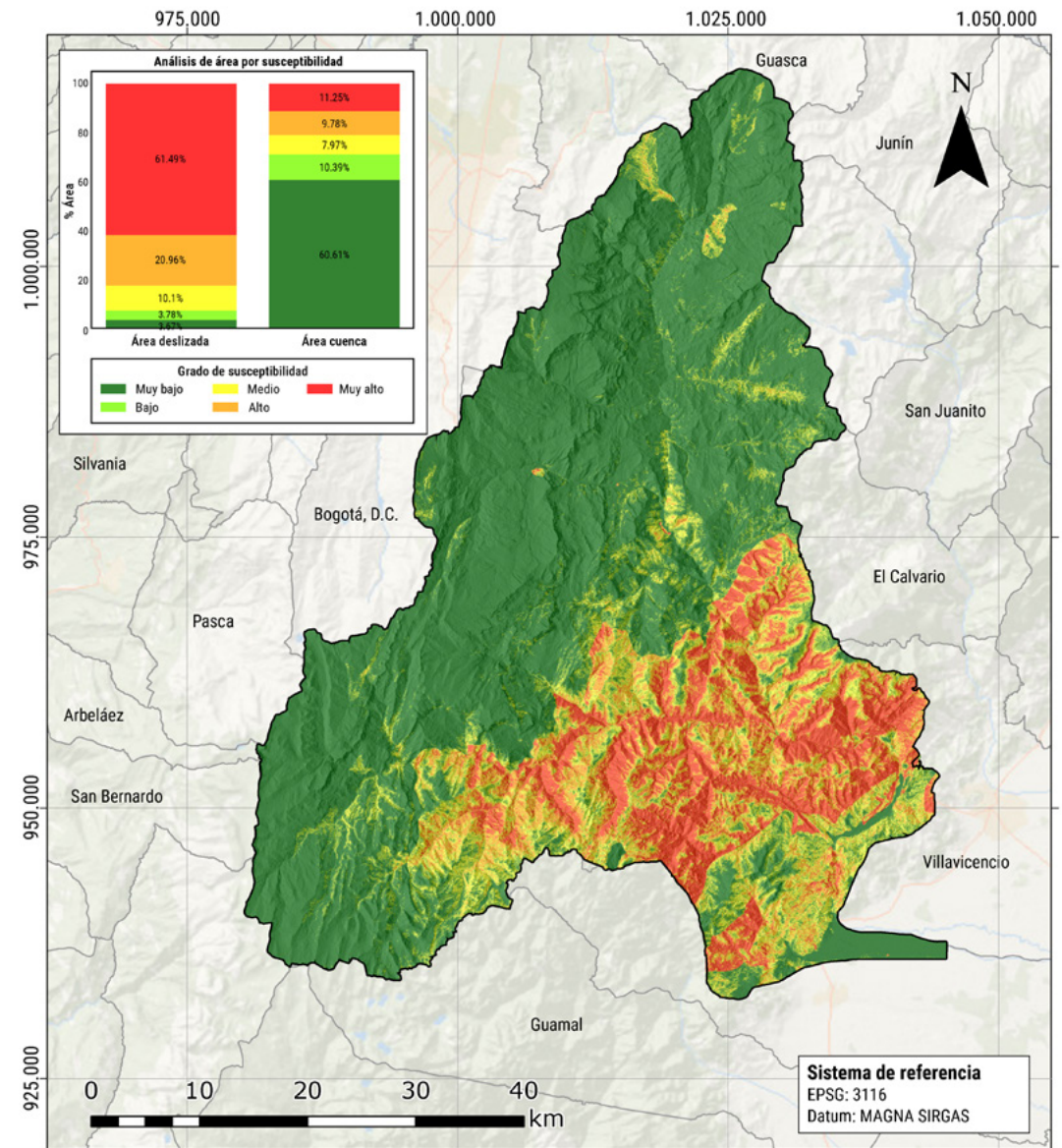
Probabilidad	Grado de susceptibilidad
0,4-0,6	Medio
0,6-0,8	Alto
0,8-1,0	Muy alto

El resultado del mapa de susceptibilidad a deslizamientos elaborado a partir del ModeloDummy que se muestra en la Figura 16, permitió identificar que el 3,67% de los deslizamientos se presentó en zonas con grado de susceptibilidad muy bajo las cuales representan el 60,61% del área de la cuenca, tales zonas presentan un porcentaje de deslizamiento por hectárea de 0,019%. Por otra parte, en las zonas con grado de susceptibilidad bajo que representan el 10,39% del área total de la cuenca, se presentaron el 3,78% de los deslizamientos, mostrando un porcentaje de deslizamiento por hectárea de 0,12%.

En las zonas definidas como grado de susceptibilidad medio se presenta el 10,1% de los deslizamientos, estas cubren el 7,97% de área de la cuenca y presentan un porcentaje de deslizamientos por hectárea de 0,41%. Las zonas con grado de susceptibilidad alto ocupan el 20,98% de la cuenca, en estas se presentan el 20,96% de los deslizamientos mapeados, indicando un porcentaje de deslizamientos por hectárea de 0,41%. Por último las zonas cuyo grado de susceptibilidad es muy alto se presentan en el 11,25% del área de la cuenca y dentro de tales se concentra el 61,49% de los deslizamientos ocurridos, presentando un porcentaje de deslizamiento por hectárea de 1,8%.

En cuanto al mapa de susceptibilidad a deslizamientos elaborado a partir del ModeloCon que se muestra en la Figura 17, se identificó que zonas con grado de susceptibilidad muy

Figura 16 - Resultado del mapa de susceptibilidad usando el ModeloDummy



bajo representan el 64,48% del área de la cuenca y contienen el 4,47% de los deslizamientos, mostrando un porcentaje de deslizamiento por hectárea de 0,022%. Las zonas con grado de susceptibilidad bajo contienen el 3,78% de los deslizamientos y ocupan el 8,84% del área de la cuenca con un porcentaje de deslizamiento por hectárea del 0,14%.

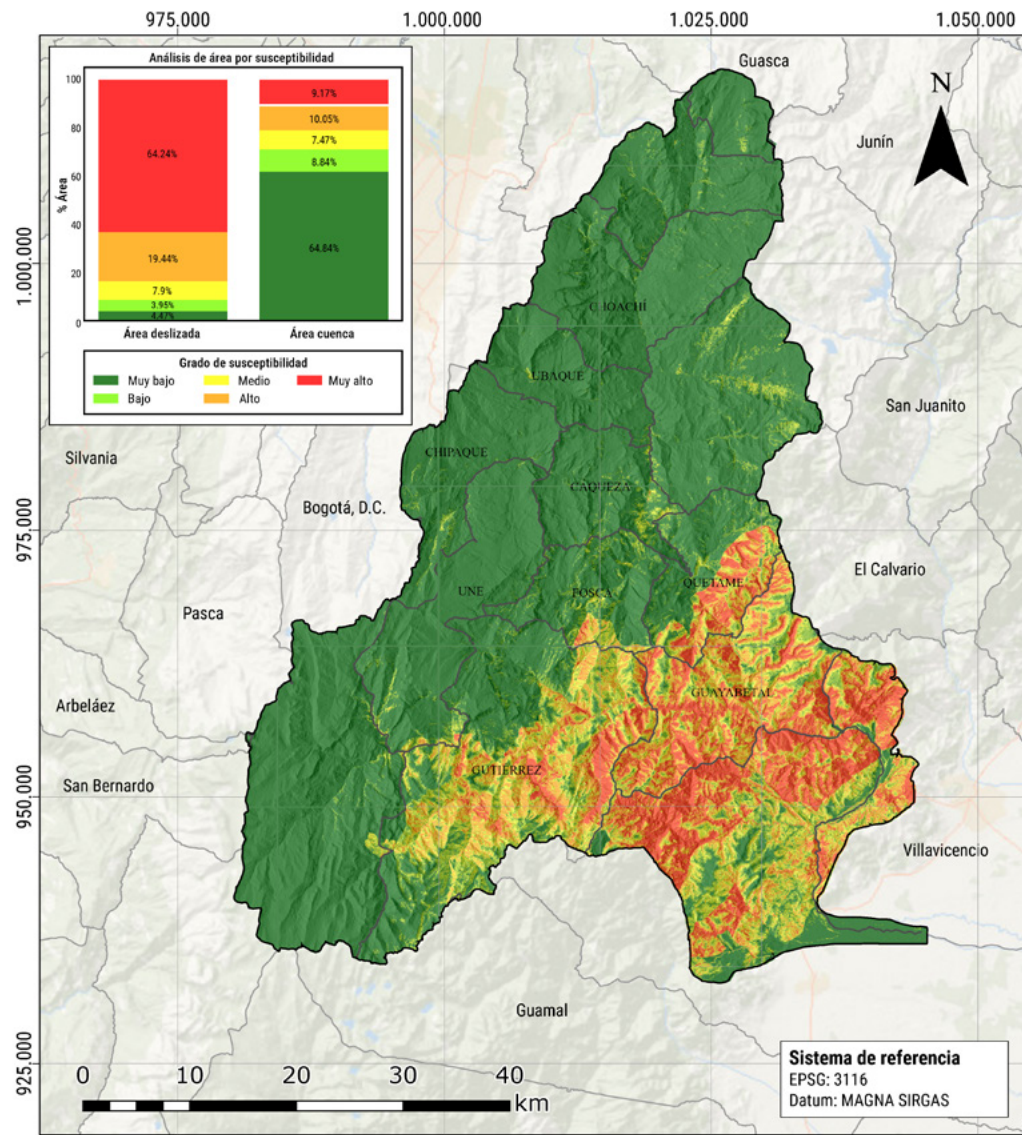
Dentro de las zonas con grado de susceptibilidad medio que cubren el 7,97% de la cuenca se presenta el 7,90% de los deslizamientos presentando un porcentaje de deslizamientos por hectárea de 0,34%. En las zonas definidas como grado de susceptibilidad alto se presenta el 19,44% de los deslizamientos, estas

cubren el 10,05% de área de la cuenca y presentan un porcentaje de deslizamientos por hectárea de 0,63%. Por último, las zonas con grado de susceptibilidad muy alto ocupan el 9,17% de la cuenca, en estas se ocurre el 64,24% de los deslizamientos mapeados, indicando un porcentaje de deslizamientos por hectárea de 2,3%.

Discusión

Las métricas de evaluación y entrenamiento descritas mostraron que el ModeloCon presentó un mejor ajuste al fenómeno mapeado, requiriendo tiempos de preparación de factores y entrenamiento de modelos menores, así como menor coste computacional. Según

Figura 17 - Resultado del mapa de susceptibilidad usando el ModeloCon



los valores de AUC que se muestran en la Figura 13, el ModeloCon presenta un desempeño en su capacidad de predicción que supera aproximadamente en 15% al mostrado por el ModeloDummy, esto concuerda con los valores de pseudo R² obtenidos para el entrenamiento de los modelos (véase Tabla 4). Igualmente, el resultado de los mapas de susceptibilidad (Figura 14 y Figura 15) muestra que el mapa elaborado a partir de los coeficientes entrenados en el ModeloCon presentó un mejor ajuste de los deslizamientos ocurridos en relación de la zona de susceptibilidad muy alta, dado que en el 9,17% del total del área de la cuenca se enmarcan el 64,24% de los deslizamientos ocurridos, mientras que en el ModeloDummy el 61,49% de los deslizamientos se presenta en el 11,25% del área de la cuenca. El resultado de los modelos de susceptibilidad elaborados

mostró una tendencia a la ocurrencia de deslizamientos en la cuenca a lo largo de un cinturón al sur oriente, sobre la cordillera oriental y el piedemonte llanero, especialmente en las zonas de los municipios de Guayabetal, Gutiérrez, Quetame, Acacias y Villavicencio que se encuentran dentro de la cuenca. Estas zonas presentan relación con rocas sedimentarias de ambiente transicional marino y rocas metamórficas de bajo grado las cuales datan de los periodos Devónico y Carbonífero (419 a 298 Ma) y periodo Ordovícico a Silúrico (485,4 a 419,2 Ma) respectivamente, pertenecientes al grupo Quetame y Farallones. En cuanto a los factores implementados, los valores de los coeficientes obtenidos durante el entrenamiento (Tabla 4) mostraron que, para los dos modelos, factores como la distancia a

las vías y ríos, la pendiente e índice TWI tienen una correlación positiva con la ocurrencia de deslizamientos, mientras que la curvatura, la elevación y la distancia a las vías presentan una correlación negativa. El valor del coeficiente entrenado para la distancia a las vías permite inferir que a nivel regional estas no juegan un papel predisponente en la ocurrencia a deslizamientos, dado que a medida que aumenta la cercanía a las vías se reduce la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos, esta afirmación claramente contrastante con la realidad de los eventos presentados sobre la vía nacional 40, se puede justificar debido a que en la zona de estudio (Figura 12) las vías se encuentran concentradas en zonas donde la ocurrencia de deslizamientos es mínima, lo que infiere que esta variable podría ser omitida en los modelos de regresión logística.

Como muestran Reichenbach et al. (2018), los factores que se tuvieron en cuenta, se encuentran dentro los criterios que con mayor frecuencia se implementan en el mapeo de la susceptibilidad a los deslizamientos. Cabe señalar que este hecho no indica que los mismos sean los más apropiados para caracterizar la existencia de deslizamientos en la cuenca, aunque, por otra parte, el resultado validado mediante el AUC y matrices de confusión, muestran la capacidad de los factores usados en los modelos, para describir el fenómeno en estudio.

En comparación con estudios como los llevados a cabo por autores como Huang et al. (2015), Zhao et al. (2019) y Aristizabal et al. (2019), los cuales se tiene en cuenta varios factores condicionantes en común con el presente estudio (elevación, pendiente, curvatura, litología, distancia a las fallas geológicas y ríos) y en los que los deslizamientos son representados mediante puntos, los modelos aquí presentados lograron un mejor rendimiento, mostrando un valor de AUC superior hasta en 13%. Por otra parte, al comparar con estudios como los realizados por Yilmaz (2009) y Ayalew y Yamagishi (2005), en los cuales las zonas deslizadas se describen por medio de polígonos capturados sobre imágenes con un tamaño de pixel de 10x10 metros. Los modelos aquí entrenados siguen presentando un mejor ajuste, de hasta un 8% en relación con los estudios mencionados.

La diferencia en el rendimiento de los modelos aquí planteados con relación a los estudios mencionados, puede verse explicada entre otros factores, por un mayor número de elementos (registros) para el entrenamiento de estos, ello dado a que en el presente estudio las zonas deslizadas fueron caracterizadas como polígonos usando un mosaico de imágenes satelitales con un tamaño de pixel de 3x3 metros, lo que implica una mejor descripción de tales zonas y un mayor número de píxeles por cada zona; el uso de un amplio dataset de entrenamiento lleva a que la convergencia de los modelo sea más acelerada, logrando niveles de precisión altos, lo que se reflejan en modelos robustos y confiables.

Conclusiones

Los modelos de susceptibilidad generados demostraron ser de gran utilidad para la identificación y mapeo de las zonas con potencial a presentar deslizamientos a nivel regional, la información obtenida a partir de estos puede ser vital para la seguridad de la vida humana y servir como insumo en planes de ordenamiento y gestión del riesgo. En general, las variables y la metodología utilizadas

presentan un ajuste adecuado a la realidad del fenómeno dentro de la cuenca del río Guayuriba, lo que se ve reflejado el valor del área bajo la curva (AUC) y la matriz de confusión que muestran un ajuste excelente para los modelos elaborados.

La resolución espacial de las variables implementadas y la caracterización de las zonas de deslizamiento como polígonos, permitió obtener un amplio número de píxeles para el entrenamiento, garantizando una buena representación de la variabilidad espacial y la relación entre los factores predisponentes y las zonas deslizadas, lo que se ve evidenciado en el rendimiento y la capacidad predictiva de los modelos. Las métricas de evaluación de estos confirman el alto rendimiento de la técnica en términos de predicción de posibles zonas de deslizamiento, la comparación entre modelos entrenados usando diferente metodología permitió validar que los modelos entrenados con variables continuas presentaron un mejor desempeño requiriendo menor coste computacional.

Agradecimientos

Se agradece a Procalculo Prosis S.A. por suministrar acceso a las imágenes satelitales de alta resolución PlanetScope, el acceso al sistema de información geográfica ArcGIS Pro y por apoyar las iniciativas de investigación de sus colaboradores promoviendo el desarrollo académico.

Referencias

Alcántara, Irasema. (2000). Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. *Investigaciones Geográficas*, 1(41). <https://doi.org/10.14350/ig159101>

Aleotti, P. y Chowdhury, R. (1999). Landslide Hazard Assessment: Summary Review and New Perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, (58), 21-44. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s100640050066>

Aristizabal, E., Vásquez, M. y Ruíz, D. (2019). Métodos estadísticos para la evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa. *Tecnológicas*, 22(46), 39-60. <https://doi.org/https://doi.org/10.22430/225653371247>

Ayalew, L. y Yamagishi, H. (2005). The Application of GIS-based Logistic Regression for Landslide Susceptibility Mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, (1-2), 15-31. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.06.010>

Bai, S., Wang, J., Lu, G. N., Zhou, P. g., Hou, S. S. y Xu, S. N. (2010). GIS-based Logistic Regression for Landslide Susceptibility Mapping of the Zhongxian Segment in the Three Gorges Area, China. *Geomorphology*, 115(1-2), 23-31. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.09.025>





Bai, S., Wang, J., Thiebes, B., Cheng, C. y Chang, Z. (2014). Susceptibility Assessments of the Wenchuan Earthquake-triggered Landslides in Longnan Using Logistic Regression. *Environmental Earth Sciences*, (71), 731-743. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12665-013-2475-z>

- Basu, T. y Pal, S. (2017). Exploring Landslide Susceptible Zones by Analytic Hierarchy Process (AHP) for the Gish River Basin, West Bengal, India. *Spatial Information Research*, 25, 665-675. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s41324-017-0134-2>
- Chauhan, S., Sharma, M., Arora, M. y Gupta, N. (2010). Landslide Susceptibility Zonation Through Ratings Derived from Artificial Neural Network. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12(5), 340-350. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2010.04.006>
- Chen, W. y Li, Y. (2020). GIS-based Evaluation of Landslide Susceptibility Using Hybrid Computational Intelligence Models. *CATENA*, (195), 104777. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104777>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2012). *Valoración de daños y pérdidas: ola invernal en Colombia, 2010-2011*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe-Cepal y el Banco Interamericano de Desarrollo-BID. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/8cf425f2-2b9b-4362-b5b5-d33e21321125/content>
- Conforti, M., Pascale, S., Robustelli, G. y Sdao, F. (2014). Evaluation of Prediction Capability of the Artificial Neural Networks for Mapping Landslide Susceptibility in the Turbolo River Catchment (Northern Calabria, Italy). *CATENA*, (113), 236-250. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.08.006>
- Cooper, M. A., Addison, F. T., Alvarez, R., Coral, M., Graham, R. H., Hayward, A. B. y Howe, S. (1995). Basin Development and Tectonic History of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia. *AAPG Bulletin*, 79(10), 1421-1442. <https://doi.org/10.1306/7834D9F4-1721-11D7-8645000102C1865D>
- Dai, F., Lee, C. y Xu, Z. (2001). Assessment of Landslide Susceptibility on the Natural Terrain of Lantau Island, Hong Kong. *Environmental Geology*, (40), 381-391. <https://doi.org/10.1007/s002540000163>
- Fawcett, T. (2006). An Introduction to ROC Analysis. *Pattern Recognition Letters*, 27(8), 861-874. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2005.10.010>
- Fondo de Adaptación. (2018). Capítulo 4. Climatología. En F. d. adaptación, POMCA *Río Guayuriba* Villavicencio : CORMACARENA.
- Goyez-Peñañiel, P. y Hernández-Rojas, A. (2021). Landslide Susceptibility Index Based on the Integration of Logistic Regression and Weights of Evidence: A Case Study in Popayan, Colombia. *Engineering Geology*, (280), 105958. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105958>
- Guillard, C. y Zezere, J. (2012). Landslide Susceptibility Assessment and Validation in the Framework of Municipal Planning in Portugal: The Case of Loures Municipality. *Environmental Management*, 50(4), 721-735. <http://doi.org/10.1007/s00267-012-9921-7>
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M. y Reichenbach, P. (1999). Landslide Hazard Evaluation: A Review of Current Techniques and Their Application in a Multi-scale Study, Central Italy. *Geomorphology*, 31(1-4), 181-216. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00078-1)
- Hair, J. F., Anderson, R. E., Tatham, R. L. y Black, W. (1999). *Análisis multivariante*. (5ª edición). Prentice Hall.
- Hosmer, D. W. y Lemeshow, S. (2000). *Applied Logistic Regression*. (3ª edición). Wiley.
- Huang, J., Zhou, Q. y Wnag, F. (2015). Mapping the Landslide Susceptibility in Lantau Island, Hong Kong, by Frequency Ratio and Logistic Regression Model. *Annals of GIS*, 21(3), 191-208. <http://doi.org/10.1080/19475683.2014.992373>
- Mandal, B. y Mandal, S. (2018). Analytical Hierarchy Process (AHP) Based Landslide Susceptibility Mapping of Lish River Basin of Eastern Darjeeling Himalaya, India. *Advances in Space Research*, 62(11), 3114-3132. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.08.008>
- Mauri, L., Cucchiari, S., Grigolato, S., Dalla Fonatana, G. y Tarolli, P. (2022). Evaluating the Interaction Between Snowmelt Runoff and Road in the Occurrence of Hillslope Instabilities Affecting a Landslide-prone Mountain Basin: A Multi-modeling Approach. *Journal of Hydrology*, 612, 128200. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128200>
- Quesada, A. y Feoli-Borasci, S. (2018). Comparación de la metodología Mora-Vahrson y el método morfométrico para determinar áreas susceptibles a deslizamientos en la microcuenca del río Macho, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, 2(61), 17-45. <https://doi.org/10.15359/rgeac.61-2.1>
- Reichenbach, P., Rossi, M., Malamud, B., Mihir, M. y Guzzetti, F. (2018). A Review of Statistically-based Landslide Susceptibility Models. *Earth-Sciences Reviews*, 180, 60-91. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.001>
- Soeters, R. y Van Westen, C. J. (1996). Slope Instability Recognition, Analysis and Zonation. En A. Keith Turner y R. L. Schuster (Eds.), *Landslides, Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board, National Research Council, Special Report 247 (pp. 129-177). National Academy Press. <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr247/sr247-008.pdf>
- Suárez, J. (2001). *Control de erosión en zonas tropicales*. (Vol. 1). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. <https://ediciones.uis.edu.co/index.php/publicacionesuis/catalog/book/124>
- Suárez, J. (2009). *Deslizamientos: análisis geotécnico*. (Vol. 1). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. <https://ediciones.uis.edu.co/index.php/publicacionesuis/catalog/book/107>
- Trigila, A., Iadanza, C., Esposito, C. y Scarascia-Mugnozza, G. (2015). Comparison of Logistic Regression and Random Forests Techniques for Shallow Landslide Susceptibility Assessment in Giampilieri (NE Sicily, Italy). *Geomorphology*, (249), 119-136. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.06.001>
- Vakhshoori, V., Reza Pourghasemi, H., Zare, M. y Blaschke, T. (2019). Landslide Susceptibility Mapping Using GIS-Based Data Mining Algorithms. *Water*, 11(11), 2292. <https://doi.org/10.3390/w11112292>
- Yalcin, A. (2008). GIS-based Landslide Susceptibility Mapping Using Analytical Hierarchy Process and Bivariate Statistics in Ardesen (Turkey): Comparisons of Results and Confirmations. *CATENA*, 72(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.01.003>
- Yilmaz, I. (2009). Landslide Susceptibility Mapping Using Frequency Ratio, Logistic Regression, Artificial Neural Networks and Their Comparison: A Case Study From Kat Landslides (Tokat-Turkey). *Computer & Geosciences*, 35(6), 1125-1138. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.08.007>
- Zhao, Y., Wang, R., Jiang, Y., Liu, H. y Wei, Z. (2019). GIS-based Logistic Regression for Rainfall-induced Landslide Susceptibility Mapping Under Different Grid Sizes in Yueqing, Southeastern China. *Engineering Geology*, 259(4), 105147. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105147>
- Zhou, S., Zhou, S. y Tan, X. (2020). Nationwide Susceptibility Mapping of Landslides in Kenya Using the Fuzzy Analytic Hierarchy Process Model. *Land*, 9(12), 535. <https://doi.org/10.3390/land9120535>



Análisis del comportamiento de los movimientos en masa en la microcuenca del caño Parrado en el municipio de Villavicencio

Analysis of the behavior of mass movements in the caño Parrado micro-basin in the municipality of Villavicencio

Andrea Carolina Quienza Nieves¹ 
 Alfonsina Bocanegra Gómez² 
 Jorge Eliecer Pardo Mayorga³ 
 Juan Manuel Salgado Díaz⁴ 

Resumen

Este estudio tiene como objetivo determinar la susceptibilidad de movimientos en masa en la microcuenca del caño Parrado, vereda Buenavista, Villavicencio, a través de la recopilación y análisis de datos siguiendo el método propuesto por el Servicio Geológico Colombiano a escala 1:25.000. Se consideran factores condicionantes como el contexto geológico, geomorfológico, cobertura del suelo, uso del suelo, y otros factores como las precipitaciones para determinar las áreas de mayor riesgo. Se destaca la importancia de identificar zonas susceptibles para planificar medidas de mitigación y prevención adecuadas. El estudio se enfoca en determinar los movimientos de masa presentes en la zona y establecer espacialmente las áreas de susceptibilidad, con el objetivo de proporcionar información clave para la toma de decisiones en la gestión del riesgo.

Palabras clave:

condiciones geoambientales, factores condicionantes, susceptibilidad de movimientos en masa.

Cómo citar

Quienza Nieves, A. C., Bocanegra Gómez, A., Pardo Mayorga, J. E. y Salgado Díaz, J. M. (2024). Análisis del comportamiento de los movimientos en masa en la microcuenca del caño Parrado en el municipio de Villavicencio. *Análisis Geográficos*, 57(1), 28 - 43.

Abstract

The objective of this study is to determine the susceptibility to mass movements in the caño Parrado micro-basin, Buenavista, Villavicencio, through the collection and analysis of data following the method proposed by the Colombian Geological Service at a scale of 1:25,000. Conditioning factors such as geological and geomorphological context, land cover, land use, and other factors such as rainfall are considered to determine the areas of greatest risk. The importance of identifying susceptible areas is emphasized in order to plan appropriate mitigation and prevention measures. The study focuses on determining the mass movements present in the area and spatially establishing the susceptibility areas, with the objective of providing key information for risk management decision making.

Keyword:

conditioning factors, geoenvironmental conditions, susceptibility to mass movements.

Introducción

En un mundo donde la interacción entre el ser humano y el entorno adquiere una importancia cada vez mayor, la Geografía emerge como una ciencia que permite comprender las dinámicas que influyen en la vida individual y colectiva. En Colombia, esta perspectiva geográfica cobra una relevancia singular en el contexto de la consolidación de la paz territorial y el compromiso de convertir al país en una potencia de la vida, tal como lo establece el Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026.

El Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), en calidad de autoridad geográfica máxima en Colombia, asume un papel central en la promoción de una "Geografía para la Vida", en el que el conocimiento del espacio físico, las interacciones naturales y las actividades humanas convergen para forjar una comprensión holística de los desafíos y oportunidades que enfrenta la sociedad. Entre estos se destacan los movimientos en masa, fenómenos geodinámicos que incluyen deslizamientos y desprendimientos de suelo y roca, que constituyen una amenaza latente en un país que tiene una geografía diversa y topografía variable. Su estudio minucioso no solo contribuye a una comprensión más completa de la interacción entre procesos naturales y actividades humanas, sino que también sirve como base fundamental para la gestión del riesgo de desastre y la planificación territorial sostenible.

Utilizar un enfoque geográfico permite delinear un camino hacia la identificación de patrones, causas y consecuencias de estos eventos, lo que a su vez puede informar estrategias de prevención y mitigación. Al establecer conexiones entre la geología, la climatología, el uso del suelo y las actividades humanas, se espera identificar las interacciones en el entorno físico que permitan generar estrategias y se conviertan en un insumo en la toma de decisiones que pueden influir en la seguridad y el bienestar de la comunidad local.

Esta investigación tiene como objetivo realizar un análisis heurístico cuantitativo de información secundaria y primaria que permitan determinar áreas que sean susceptibles a generar movimientos en masa en la microcuenca media de caño Parrado mediante la recopilación de información enfocada en la guía metodológica para la zonificación de amenazas por movimientos de masa del Servicio Geológico Colombiano del 2017 a escala 1:25.000.

El área de estudio corresponde a la microcuenca hidrográfica de caño Parrado, la cual hace parte de la cuenca del río Guatiquía y se encuentra ubicada al noroccidente del casco urbano del mu-

nicipio de Villavicencio en el departamento del Meta (Figura 1). Su cauce atraviesa los barrios Brisas del Guatiquía, Emporio, El Triunfo, La Esmeralda, Centro, Villa Julia, entre otros. De acuerdo con el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de Villavicencio cuya vigencia es de 2015 a 2027, la zona fue catalogada como amenaza alta para movimientos en masa.

Debido a la presencia de este fenómeno que está afectando a la población ubicada en las inmediaciones del caño y también por las tendencias de aumento del tejido urbano continuo y discontinuo (barrios), se han presentado consecuencias como el establecimiento de asentamientos informales, lo que se traduce en un aumento de los elementos expuestos a los movimientos en masa, que agrava los escenarios de riesgo socionatural.

Por este motivo, se realizó un análisis del área, específicamente del cauce intermedio de la microcuenca, que corresponde al área urbana, para determinar los factores condicionantes, representados por el contexto, es decir: geológicos, geomorfológicos, de cobertura de la tierra y uso de suelo; así como los factores detonantes, a partir del estudio de las condiciones de precipitación mediante un mapa de isoyetas con las precipitaciones anuales comprendidas entre 1998 y 2010 y los datos de sismos ocurridos en el sector entre el 2000 al 2020, que influyen en los movimientos de masa presentes en la zona.

El proyecto se erige como uno de los principales pilares para el análisis de la susceptibilidad a movimientos en masa en la zona de estudio, con miras a posibles eventos. Utilizará los Sistemas de Información Geográfica (SIG) como herramienta de geoprocetos, los cuales agilizan el análisis de la información del terreno donde se producen estos fenómenos. Además, mediante el empleo de sensores remotos, software y el análisis de datos en los SIG, se pueden crear modelos tanto del terreno como de los eventos de remoción en masa. Para llevar a cabo esto, es imperativo contar con información geológica, geomorfológica, y de uso del suelo, entre otros datos, sobre el área de estudio. Es por esta razón que se está llevando a cabo un estudio mediante la aplicación de SIG para la ciudad de Villavicencio, específicamente en el sector de caño Parrado, en la parte alta de la ciudad, que se encuentra ubicada sobre la cordillera Oriental, con el objetivo de evaluar la susceptibilidad a movimientos en masa.

Caño Parrado: más de 25 años de amenazas socionaturales
 Durante su historia, el departamento de Meta ha enfrentado eventos de desplazamientos de tierra que han causado inestabilidad del

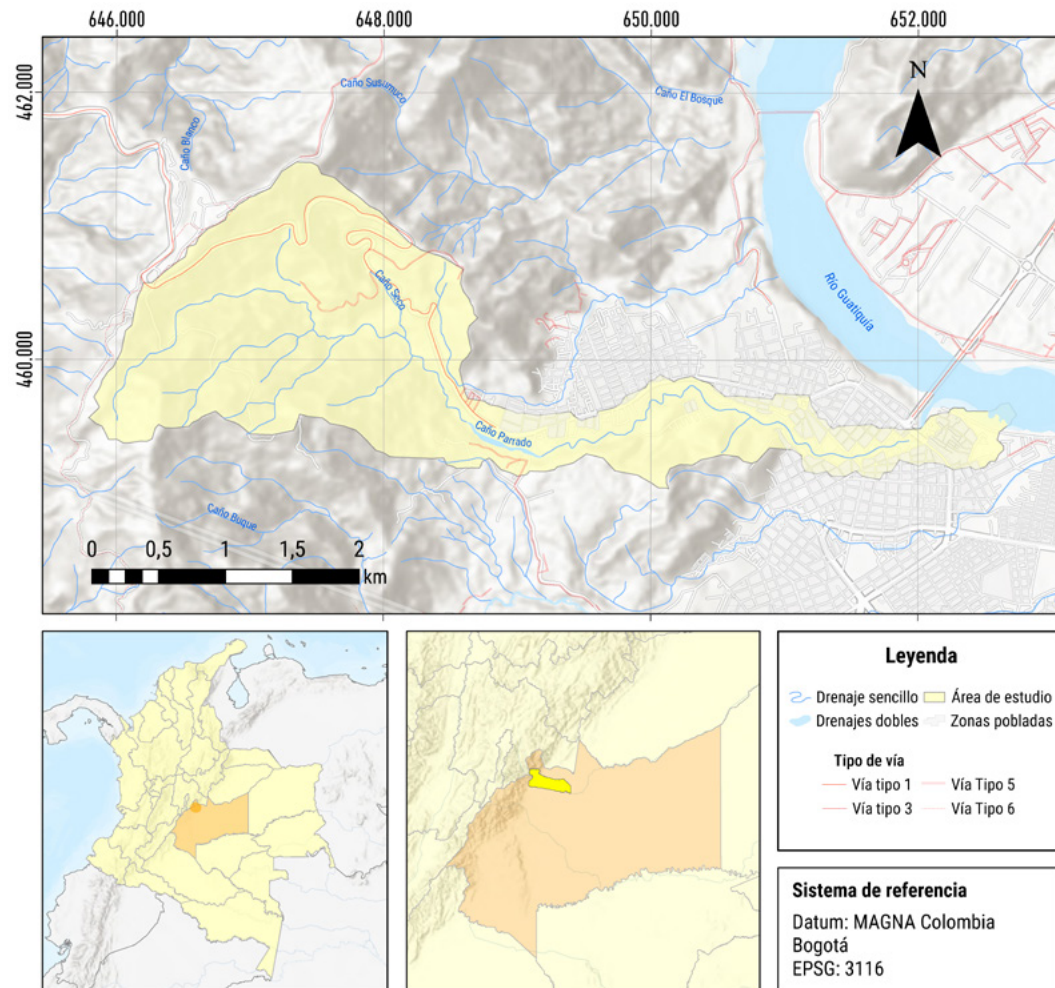
1 Universidad Santo Tomas seccional Villavicencio. andreaquenza@ustavillavicencio.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9825-6199>.

2 Universidad Santo Tomas seccional Villavicencio. alfonsinabocanegra@ustavillavicencio.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3815-3902>.

3 Universidad Santo Tomas seccional Villavicencio. jorgepardo@ustavillavicencio.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7605-8386>.

4 Universidad Santo Tomas seccional Villavicencio. juansalgado@ustavillavicencio.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9680-2638>.

Figura 1 - Mapa de localización



Fuente: elaboración propia a partir de la base cartográfica del IGAC, 2014.

terreno y afectado a la población. De acuerdo con el Sistema de información de Movimientos de Masa (SIMMA), entre 1960 y 2017, se reportan 129 movimientos en masa, con ocurrencia del 73% en Villavicencio. De la totalidad de movimientos el 51% corresponde a deslizamientos (Servicio Geológico Colombiano, 2019). En Colombia, esta amenaza se presenta con recurrencia ocasionadas por las condiciones geológicas, geomorfológicas y de las precipitaciones.

A nivel local, la zonificación de susceptibilidad por avenidas torrenciales en la cuenca del río Guatiquía, realizada a escala 1:25.000 en el año 2017, indica la necesidad de priorizar estudios detallados sobre amenazas y riesgos asociados a avenidas torrenciales en ciertas microcuencas de esta arteria fluvial. Estos estudios se justifican por la presencia de diversos procesos, como movimientos en masa y erosión en cárcavas, que podrían desencadenar en futuras avenidas torrenciales, a partir de lo anterior, entre las cuencas se destaca la del caño Parrado

(Alcaldía de Villavicencio, 2020). Según Nelson Vivas Mora, un ambientalista y asesor de la Secretaría del Medio Ambiente de Villavicencio, los problemas en los taludes del caño Parrado han estado ocurriendo durante un período que abarca desde hace 25 a 17 años debido a la invasión progresiva del área circundante, especialmente en la margen izquierda del caño (Ardila, 2020).

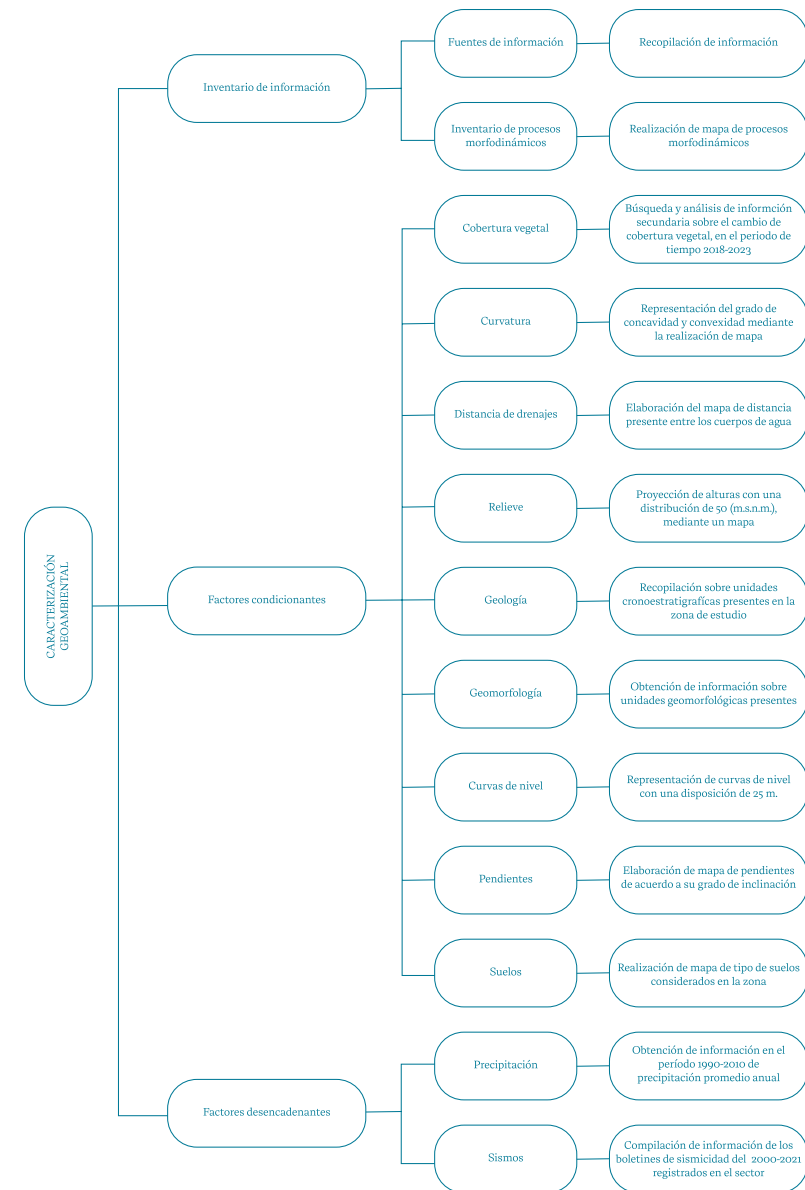
Por ello, el trabajo pretende realizar un análisis de información para determinar las áreas susceptibles a generar movimientos de masa dentro de la microcuenca. Este análisis se realizó mediante la recopilación y procesamiento de datos, utilizando el método propuesto por Servicio Geológico Colombiano en la *Guía metodológica para la zonificación de amenazas por movimientos de masa* escala 1:25.000, publicada en 2017. Este enfoque metodológico permitirá identificar con precisión las zonas de mayor riesgo dentro de la microcuenca, proporcionando así información invaluable para la planificación y ejecución de medidas de mitigación y prevención adecuadas.

Metodología

De acuerdo con los objetivos establecidos y el alcance del proyecto, este se ejecutó en conformidad con los lineamientos sugeridos en la Guía metodológica ya citada, que comprende tres etapas: caracterización geoambiental, análisis de susceptibilidad y caracterización de la amenaza. Dado que el enfoque de este proyecto es descriptivo en la determinación de áreas de susceptibilidad, se implementaron las dos primeras etapas.

La primera etapa se divide en tres actividades (Figura 2): en la primera actividad, se llevó a cabo la recopilación de información, que consistió en el levantamiento de datos en campo y la revisión de información secundaria. Esta información permitió determinar los factores condicionantes, incluidos el contexto geológico, geomorfológico, la cobertura del suelo y el uso de este, así como otros elementos como curvatura, distancia de drenaje y relieve. Se estudiaron las condiciones de precipitación mediante un mapa de isoyetas que

Figura 2 - Metodología de la fase de caracterización geoambiental



abarca las precipitaciones anuales entre 1998 y 2010, así como los datos de los sismos ocurridos en el sector entre 2000 y 2020, los cuales influyen en los movimientos de masa presentes en la zona.

Posteriormente, se obtuvieron los mapas de caracterización geoambiental como insumo para la zonificación de las áreas de susceptibilidad. Estas se establecieron mediante el método de análisis espacial heurístico por pesos ponderados, es decir: un método de tipo bivariado en donde se valoran las posibles áreas de movimiento en masa a futuro. Para este método, se realizó el análisis a partir de archivos tipos ráster con celdas de información de 10 x 10 m, generando así nueve factores, de los cuales, ocho son de carácter condicionante (pendiente, suelos, cobertura, relieve, geomorfología, geología y distancia de drenajes), y un mapa de isoyetas del registro de las precipitaciones anuales comprendidas entre 1998 y 2010, cabe destacar que la información se combina con la obtenida en las visitas de campo (Figura 3).

Resultados y discusión

Caracterización geoambiental

Durante la visita de campo, se pudo observar la presencia de procesos que han sido objeto de intervención a través de diversos

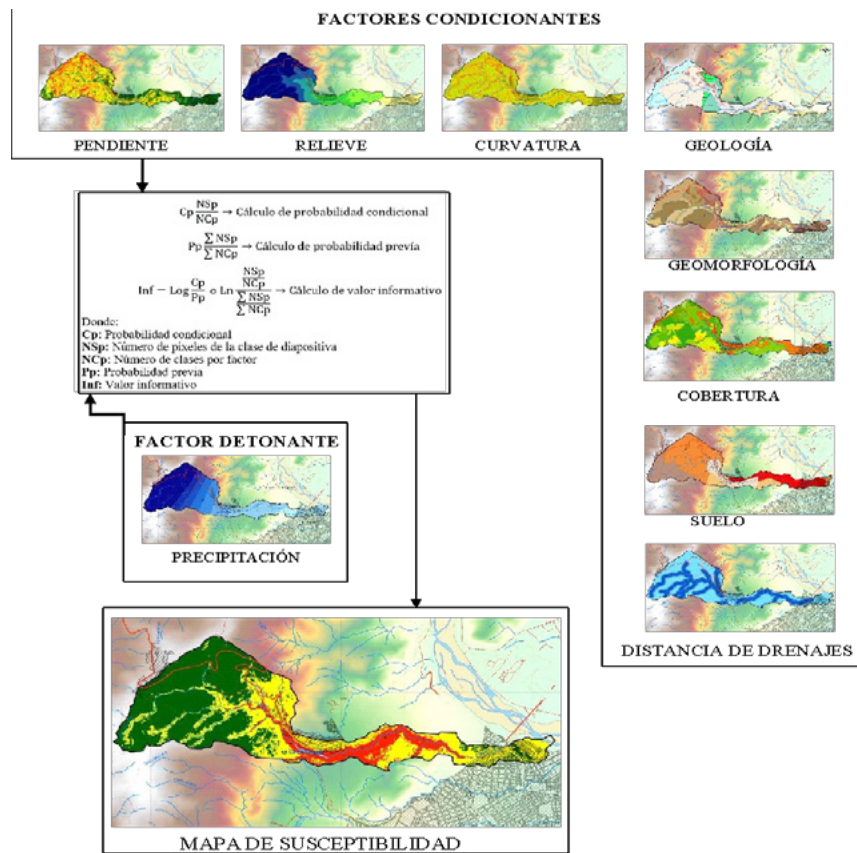
procedimientos. En este contexto, se llevó a cabo el inventario exclusivamente de los procesos activos (Tabla 1). Es importante destacar que los movimientos en masa se manifiestan en varias superficies de suelo y/o roca, principalmente debido a la acción de la gravedad y al elevado grado de deformación y meteorización del material litológico. Estos fenómenos suelen ocurrir en áreas desprovistas de vegetación o con una cobertura vegetal baja, acompañados de un elevado contenido de humedad en el suelo.

Tabla 1 - Inventario de movimientos en masa presentes en la microcuenca de caño Parrado

Nº	Tipo de movimiento	Importancia	Latitud	Longitud	Altura (m)
1	Caída	Alta	04°09'39,7"	73°38'59,1"	561
2	Deslizamiento	Alta	04°09'39,6"	73°38'58,9"	568
3	Deslizamiento	Alta	04°09'40,7"	73°39'00,1"	562
4	Caída	Alta	04°09'39,7"	73°39'01,0"	545
5	Deslizamiento	Alta	04°09'39,7"	73°39'00,9"	550
6	Deslizamiento	Alta	04°09'38,6"	73°39'03,0"	538
7	Deslizamiento	Alta	04°09'37,5"	73°39'04,4"	533
8	Deslizamiento	Alta	04°09'37,6"	73°39'04,7"	537
9	Deslizamiento	Alta	04°09'40,5"	73°38'59,2"	588
10	Deslizamiento	Alta	04°09'40,8"	73°38'59,0"	571
11	Deslizamiento	Alta	04°09'41,1"	73°38'59,1"	593
12	Deslizamiento	Alta	04°09'42,5"	73°38'56,7"	558
13	Deslizamiento	Alta	04°09'42,6"	73°38'56,8"	558

Nota: el 84,6% de los movimientos corresponde a movimientos de masa catalogados como deslizamiento.

Figura 3 - Metodología bivariado de valor informativo



Factores condicionantes

El análisis detallado de múltiples factores como la cobertura vegetal, geomorfología, pendiente, curvatura del terreno, distancia de drenajes, geología, relieve y suelos en la microcuenca de caño Parrado revela influencias clave en los movimientos en masa. Estos elementos proporcionan una visión completa de las condiciones ambientales y geológicas que predisponen a estos fenómenos. Desde cambios en la vegetación hasta características del terreno y la geología local, cada aspecto desempeña un papel esencial en la comprensión y prevención de estos riesgos naturales. Este conocimiento integral respalda la implementación de medidas efectivas de gestión y prevención.

Cobertura de la tierra

Uno de los factores condicionantes importantes en la ocurrencia de movimientos en masa se presenta por la transición (cambio) entre tipos de cobertura de la tierra, ya sea por causas naturales o antrópicas. Esto implica el cambio de los factores mecánicos dado su estado de tensión inicial, los cuales controlan la erosión, resistencia del suelo, protección del suelo y enraizamiento (Servicio Geológico Colombiano, 2017).

La falta de coberturas vegetales dentro del grupo de coberturas erosivos y, por consiguiente, a los movimientos en masa (Ruiz et al., 2013). Cuando no hay vegetación presente, los agentes erosivos como la lluvia y el viento actúan de manera más intensa, exacerbando la erosión. Este efecto se ve acentuado en climas bimodales, como los que se encuentran en el área de estudio.

Los cambios sobre las coberturas de la tierra se presentan en áreas boscosas ubicadas en el sector de estudio, el aspecto predominante, pues abarcan un 30,43% de la microcuenca de caño Parrado. Le siguen los pastizales, con un porcentaje de área del 20,82%. Por último, se observa un valor menor para las tierras desprovistas y degradadas, representando un 0,96% del área total en 2018 (Tabla 2).

Tabla 2 - Coberturas de la tierra para el año 2018 de la microcuenca de caño Parrado

ID	Tipo de cobertura	Área (ha)	Área (%)
1	Bosque abierto alto	42,64	7,13
2	Bosque abierto bajo	2,74	0,46
3	Bosque de galería arbolado	45,66	7,64
4	Bosque de galería mixto	4,33	0,72
5	Bosque de galería y ripario	7,94	1,33
6	Bosque denso alto	78,66	13,16
7	Guadua asociada a cuerpos de agua	8,14	1,36
8	Mosaico de cultivos y espacios naturales	5,87	0,98
9	Mosaico de pastos cultivos y espacios naturales	19,23	3,22
10	Mosaico de pastos y cultivos	13,00	2,17
11	Mosaico de pastos y espacios naturales	26,46	4,42
12	Pastos arbolados	9,93	1,66
13	Pastos degradados	3,17	0,53
14	Pastos enmalezados	74,94	12,53
15	Pastos limpios	36,42	6,09
16	Red vial	2,19	0,37
17	Ríos	6,57	1,10
18	Tejido urbano continuo	100,15	16,75
19	Tejido urbano discontinuo	19,16	3,21
20	Tierras desprovistas y degradadas	5,76	0,96
21	Vegetación secundaria alta	23,28	3,89
22	Vegetación secundaria baja	61,63	10,31
Total		597,88	100

Fuente: adaptado de IDEAM, 2018

Se observan cambios significativos en la cobertura, con un aumento del 15,48% en las zonas boscosas y una disminución del 8,48% en los pastos arbolados. Además, se detectó una reducción del 1,36% en la presencia de guadua asociada a cuerpos de agua. Paralelamente, se identificó un incremento en el tejido urbano, que ascendió del 19,96% al 21,57%, acompañado de un aumento en el porcentaje de tierras desprovistas y degradadas (Tabla 3, Figura 4). Esta última transformación conlleva a una degradación de las propiedades del suelo, lo que favorece la inestabilidad de las laderas de la microcuenca. Es crucial tener en cuenta que la cobertura de tierra ejerce una influencia significativa en las propiedades hidrológicas y mecánicas del suelo, ya que mejora su cohesión, fortalece la matriz del suelo y aumenta su potencial mátrico mediante procesos como la evapotranspiración y la intercepción (Gómez y Kavzoglu, 2005).

Tabla 3 - Coberturas de la tierra para el año 2023 de la microcuenca de caño Parrado

ID	Tipo de cobertura	Número de píxeles	Área (ha)	Área (%)
1	Bosque abierto alto	3.371	52,67	8,74
2	Bosque abierto bajo	674	10,53	1,75
3	Bosque de galería arbolado	3.848	60,13	9,97
4	Bosque de galería mixto	4.425	69,14	11,47
5	Bosque denso alto	5.395	84,30	13,98
6	Mosaico de pastos cultivos y espacios naturales	61	0,95	0,16
7	Mosaico de pastos y cultivos	0	0	0
8	Mosaico de pastos y espacios naturales	1.999	31,23	5,18
9	Pastos arbolados	2.079	32,48	5,39
10	Pastos degradados	364	5,69	0,94
11	Pastos enmalezados	1.419	22,17	3,68
12	Pastos limpios	899	14,05	2,33
13	Red vial	345	5,39	0,89
14	Ríos	632	9,88	1,64
15	Tejido urbano continuo	6.869	107,33	17,80
16	Tejido urbano discontinuo	1.455	22,73	3,77
17	Tierras desnudas y degradadas	420	6,56	1,09
18	Vegetación secundaria alta	2.011	31,42	5,21
19	Vegetación secundaria baja	2.316	36,19	6
Total			602,84	100

Geomorfología

En el área de estudio se presenta la siguiente distribución geomorfológica: un 20,38% corresponde a lomo denudado, un 12,96% a ladera escarpada y otro 12,96% a abanico fluvio-torrencial coalescente antiguo; estas subunidades son las más representativas a lo largo de la cuenca caño Parrado. Además, se presentan, con porcentajes menores, subunidades de cuenca denudada en la cuenca alta y de conos de talud en la parte baja, los cuales alcanzan el 0,02% y 0,03%, respectivamente (Figura 5). Las tres subunidades con mayor porcentaje pertenecen a un ambiente denudacional, fluvial y estructural, respectivamente, indicando en el primer caso el desarrollo de procesos exógenos de degradación debido a la acción de factores ambientales como la lluvia, meteorización, erosión y transporte, de origen gravitacional y pluvial. En cuanto al abanico fluvio-torrencial, su génesis está asociada al ambiente montañoso y fluvial, mientras que la ladera escarpada está relacionada con el levantamiento de la cordillera, al encontrarse en el piedemonte de la cordillera oriental.

Figura 4 - Mapa de coberturas de la tierra

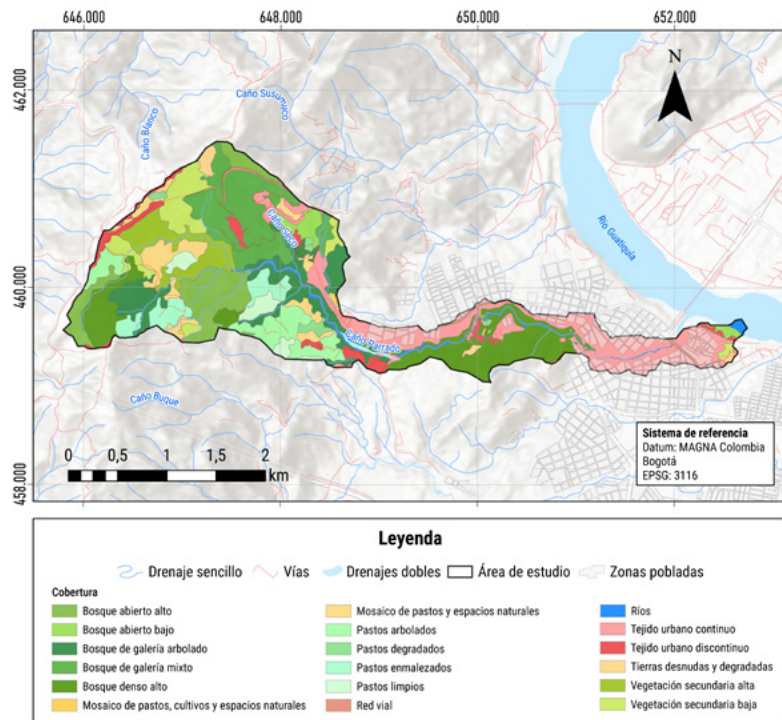
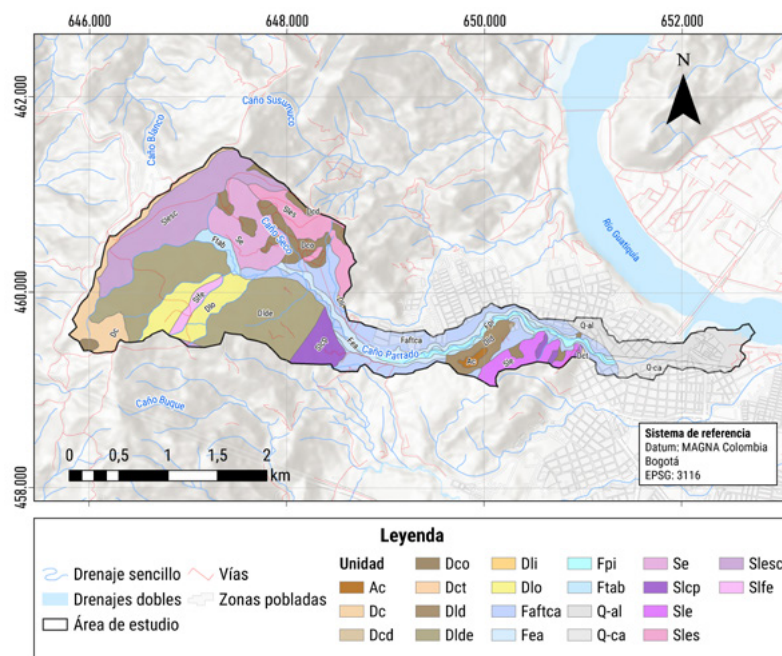


Figura 5 - Mapa geomorfológico de la microcuenca del caño Parrado



Fuente: adaptado de Servicio Geológico Colombiano e IGAC, 2018.

Pendiente

La pendiente desempeña un papel crucial como factor condicionante en los movimientos en masa, particularmente en áreas con pendientes pronunciadas (Chen et al., 2016). En el caso de la microcuenca caño Parrado, su altimetría de referencia con respecto a Villavicencio es de 467 m.s.n.m., con una amplia diversidad de pendientes. Estas pendientes se encuentran dentro de un rango de 0° a 55°, clasificadas en siete rangos según la guía metodológica 1:25.000 y adaptadas de acuerdo con las especificaciones del IGAC para el área de estudio (Tabla 4).

Tabla 4 - Rangos de pendientes presentes en la microcuenca del caño Parrado

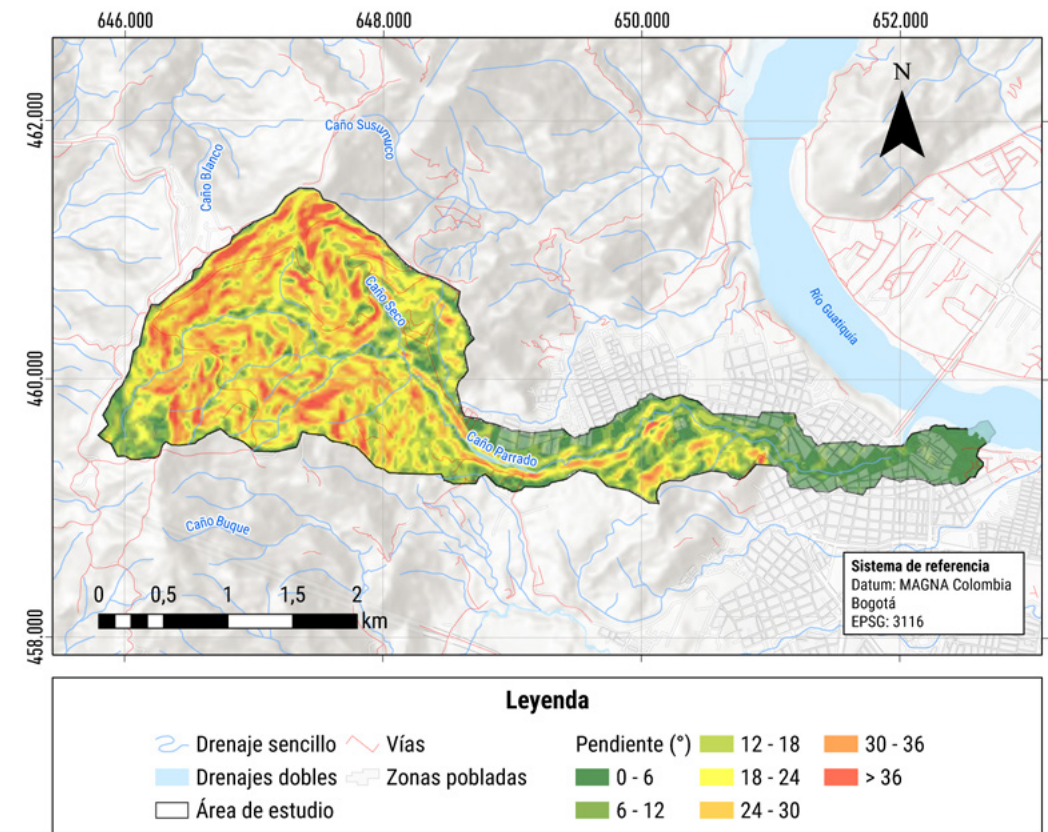
ID	Intervalo (°)	Descripción	Número de píxeles	Área (ha)	Área (%)
1	0 - 6	Plano	6.091	95,17	15,91
2	6 - 12	Ligeramente plano	5.408	84,50	14,13
3	12 - 18	Ligeramente inclinado	6.593	103,02	17,22
4	18 - 24	Fuertemente ondulado	8.190	127,97	21,39
5	24 - 30	Fuertemente quebrado	6.786	106,03	17,73
6	30 - 36	Escarpado	3.799	59,36	9,92
7	> 36	Muy escarpado	1.417	22,14	3,70
Total			38.284	598,19	100,00

El intervalo de pendiente con el mayor porcentaje de área se sitúa en el rango de 18°-24°, abarcando 127.97 ha (Tabla 4). Esta zona se ubica en la parte alta de la microcuenca y se extiende hacia la parte media de la misma. Además, el 52,74% del área presenta pendientes que varían desde fuertemente onduladas hasta muy escarpadas (Figura 6). Según la clasificación de susceptibilidad para movimientos de masa por variable de pendiente, estas áreas oscilan entre la categoría de mediana a muy alta (Suarez, 1998).

Curvatura

La curvatura del terreno señala el nivel de concentración o dispersión del drenaje superficial. En áreas cóncavas, el flujo se dirige hacia la celda central, mientras que en las convexas se dispersa. Es importante destacar que los valores positivos indican una superficie lateralmente convexa, mientras que los valores negativos señalan una superficie lateralmente cóncava (Servicio Geológico Colombiano, 2017) (Tabla 5).

Figura 6 - Mapa de pendientes



Fuente: adaptado de Servicio Geológico Colombiano e IGAC, 2018.

Tabla 5 - Áreas de intervalos de curvatura presentes

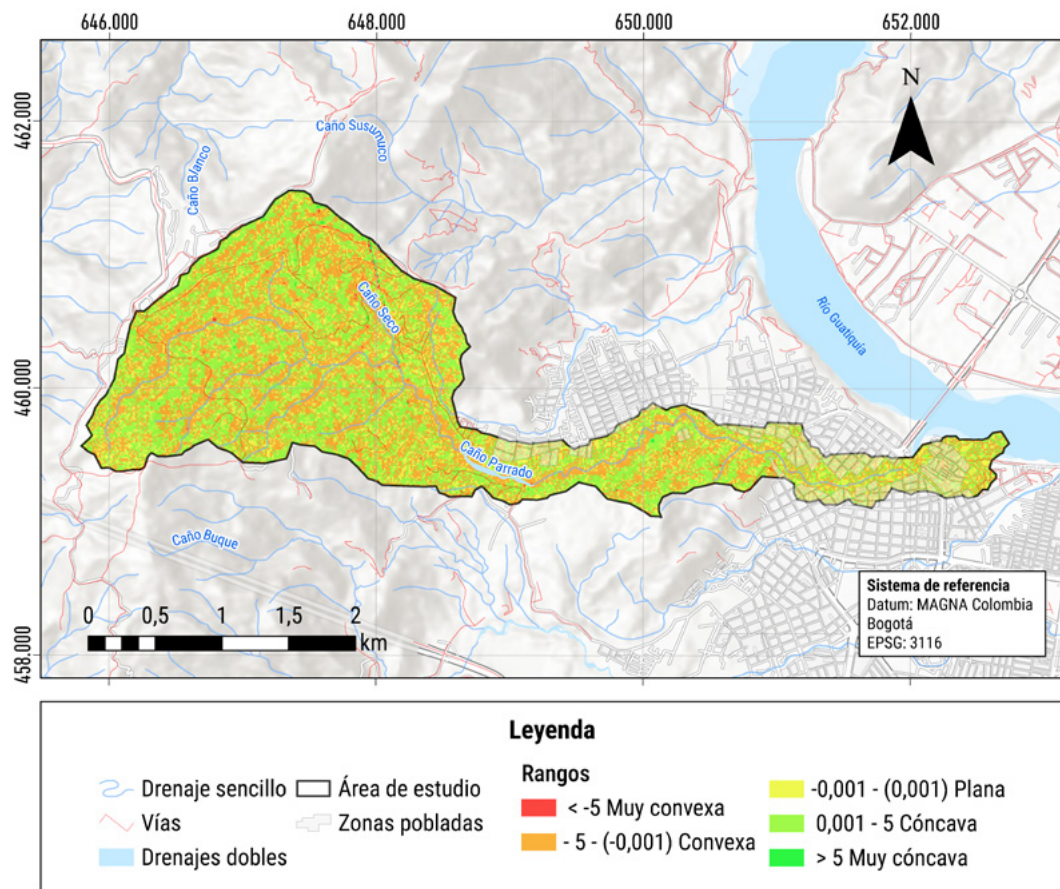
ID	Intervalos	Número de píxeles	Área (ha)	Área (%)
1	< -5	50	0,78	0,13
2	-5 - (-0,001)	15.220	237,81	39,82
3	-0,001 - (0,001)	7.851	122,67	20,54
4	0,001 - 5	15.038	234,97	39,34
5	> 5	64	1	0,17
Total		38.223	597,23	100,00

La (Figura 7) muestra claramente la distribución de la curvatura del terreno. En las superficies convexas, los flujos tienden a dispersarse, mientras que, en las cóncavas, el agua lluvia tiende a concentrarse, lo que constituye un factor morfológico crucial en la generación de movimientos en masa superficiales (Santacana, 2001). De acuerdo con los datos de la Tabla 5, se observa que el dominio de curvatura cóncava predomina con un 60,16% de cobertura, principalmente ubicado sobre los afluentes y el drenaje principal, donde se acumulan el material producto de la erosión de las márgenes, contribuyendo con la posible ocurrencia de

flujos de detritos. Por otro lado, el segundo dominio, que abarca un 39,64% del área, corresponde a zonas convexas localizadas entre los drenajes afluentes, contribuyendo con la erosión y aumentando el riesgo de movimientos de masa.

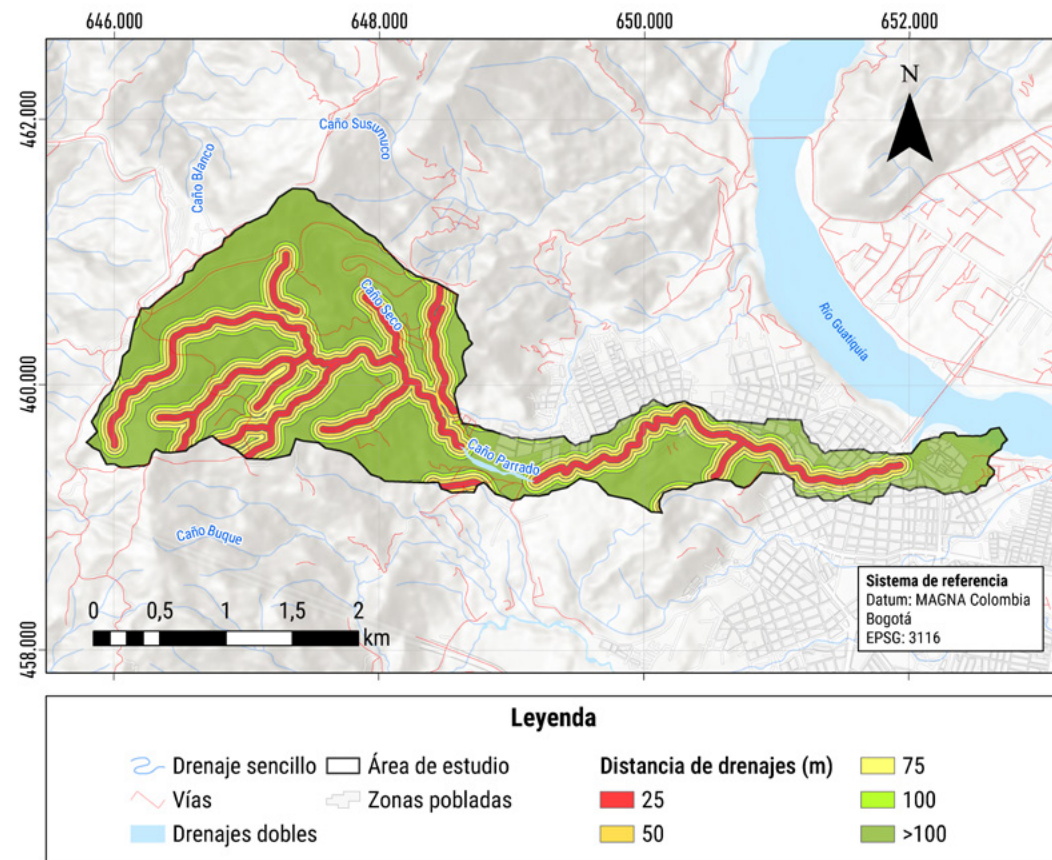
Distancia de drenajes
Las distancias de los drenajes se analizaron para identificar las áreas más susceptibles a movimientos en masa debido a su cercanía a estos cursos de agua (Figura 8). Las zonas próximas a los drenajes tienden a experimentar una mayor erosión y saturación del suelo, lo que incrementa el riesgo de deslizamientos y otros eventos de este tipo. Este parámetro está asociado con el arrastre de material durante las fuertes precipitaciones, así como con la contribución de material detrítico y suelo proveniente de movimientos de masa en el área. En el área de estudio, prevalece un intervalo de distancia superior a los 100 metros, cubriendo un 51,89% del área total (Tabla 6).

Figura 7 - Mapa de curvatura



Fuente: adaptado de Servicio Geológico Colombiano e IGAC, 2018.

Figura 8 - Mapa de distancia de drenajes presentes en el área de estudio



Fuente: adaptado de Servicio Geológico Colombiano e IGAC, 2018.

Tabla 6 - Intervalos de distancia de drenajes

ID	Intervalo (m)	Área (ha)	Área (%)
1	0 - 25	74,89	12,53
2	25 - 50	73,64	12,32
3	50 - 75	71,49	11,96
4	75 - 100	67,63	11,31
5	> 100	310,23	51,89
Total		597,88	100

Geología

En la microcuenca de caño Parrado las rocas que afloran son de calidad mala a regular del grupo Palmichal y Cáqueza, con un porcentaje predominante de suelos transportados de origen aluvial, coluvial y fluviotorrencial. Los movimientos presentes varían debido al comportamiento de diversas condiciones ambientales, como es el caso de la litología presente, grado de meteorización, afectación estructural, entre otras. En la zona predomina las unidades pertenecientes a depósitos del Cuaternario y al Grupo Cáqueza, conformado por las formaciones areniscas de Cáqueza, lutitas de Macanal, brechas de Buenavista (Tabla 7) (Figura 9).

Tabla 7 - Formaciones geológicas presentes en la microcuenca del caño Parrado

ID	UGS	Descripción	Área (ha)	Área (%)
1	Q-al	Mezcla de arcilla, limo, arena (principalmente cuarzo), grava y materia orgánica.	42,76	7,15
2	Q-ca	Constituido por bloques y guijos de areniscas, lutitas y calizas embebidos en una matriz arenosa limosa.	13,78	2,30
3	Rmaap	Roca de calidad mala de areniscas y arcillolitas del Grupo Palmichal.	36,13	6,04
4	Rmlm	Roca de calidad mala de lutitas de la formación Lutitas de Macanal.	23,59	3,95
5	Rracbb	Roca de calidad regular de conglomerados y areniscas de la formación Brechas de Buenavista.	96,08	16,07
6	Rrca	Roca de calidad regular de areniscas de la formación Areniscas de Cáqueza.	41,89	7,01
7	Rrcfgy	Roca de calidad regular de cuarcitas y filitas de la formación Guayabetal.	188,62	31,55

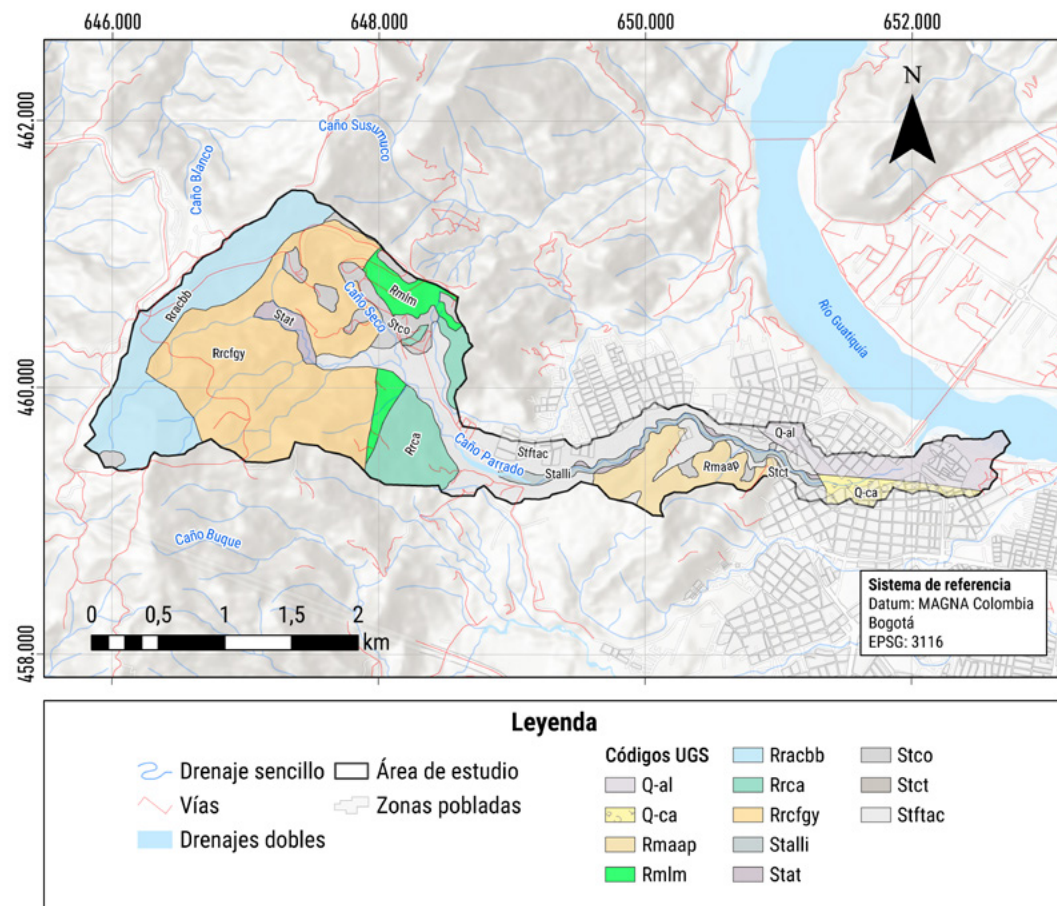
ID	UGS	Descripción	Área (ha)	Área (%)
8	Stalli	Suelo transportado aluvial de llanura de inundación.	14,05	2,35
9	Stat	Suelo transportado aluvial de terraza.	9,23	1,54
10	Stco	Suelo transportado coluvial.	31,32	5,24
11	Stct	Suelo transportado de cono de cono de Talus.	0,21	0,03
12	Stftac	Suelo transportado fluvio-torrencial de abanico coalescente antiguo.	100,23	16,70
Total			597,88	100,00

Fuente: adaptado de la plancha geológica 266, escala 1:25,000, Servicio Geológico Colombiano, 2017.

En el sector predominan las areniscas de la formación de Cáqueza, las cuales muestran un alto grado de meteorización (IV), baja cohesión y un contenido de humedad elevado (Figura 9).

Las rocas en el área de estudio están altamente diaclasadas resultado de la fracturación causada por los esfuerzos tectónicos. Este fenómeno facilita la infiltración del agua al poseer mayor área de exposición lo que a su vez incrementa el grado de meteorización física y química, contribuyendo así al desarrollo de movimientos de masa.

Figura 19 - Mapa de curvatura



Fuente: adaptado de Servicio Geológico Colombiano e IGAC, 2018.

Relieve

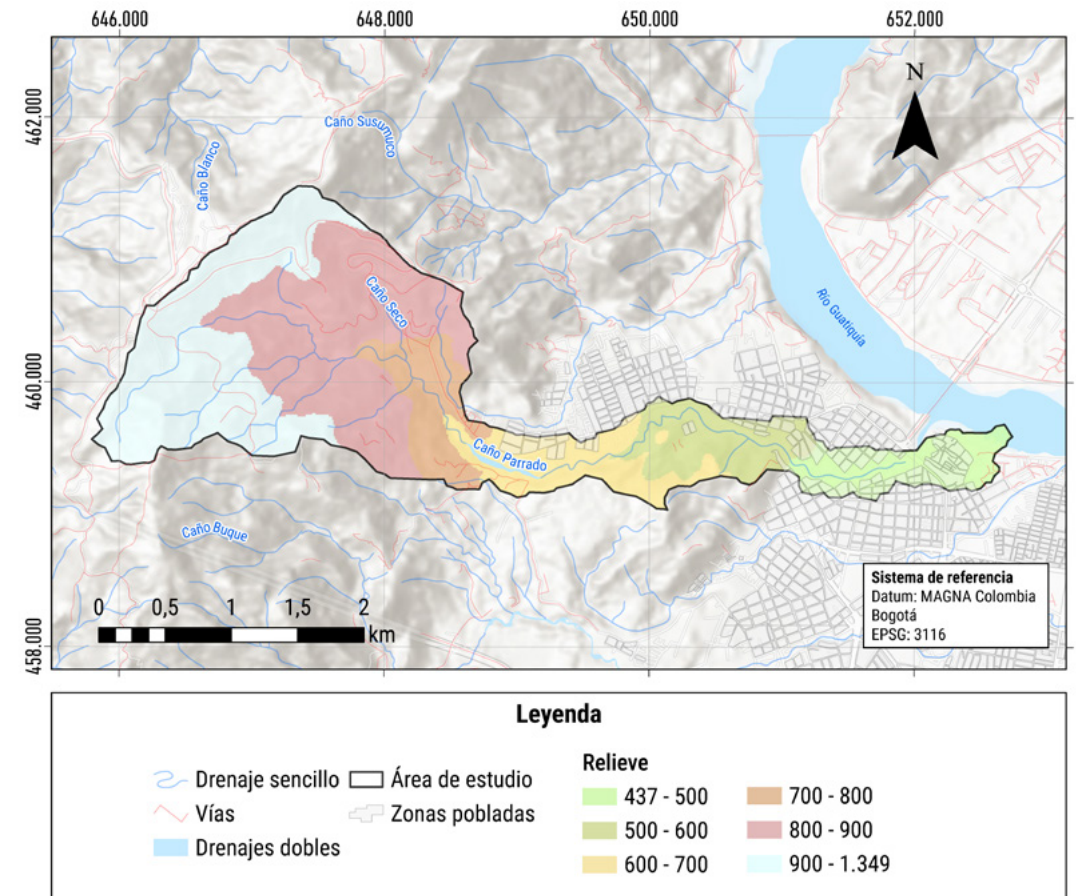
El 47,63% del área de estudio se encuentra a alturas superiores a los 900 m.s.n.m., donde se han identificado algunos de los movimientos de masa registrados (Tabla 8, Figura 10).

Tabla 8 - Intervalos de altura en el mapa de relieve

ID	Intervalo (m.s.n.m.)	Número de píxeles	Área (ha)	Área (%)
1	437 - 500	3574	55,84	9,35
2	500 - 600	3.831	59,86	10,02
3	600 - 700	4.130	64,53	10,81
4	700 - 800	3.445	53,83	9,01
5	800 - 900	5.038	78,72	13,18
6	> 900	18.205	284,45	47,63
Total		38.223	597,23	100,00

Además, en el sector occidental se concentran las zonas con las pendientes más pronunciadas, previamente identificadas como áreas de susceptibilidad media para movimientos de masa. En esta región, los valores de precipitación superan los 460

Figura 10 - Mapa de relieve de la cuenca caño Parrado



Fuente: adaptado de Servicio Geológico Colombiano e IGAC, 2018.

milímetros, especialmente en las áreas de mayor altitud, lo que influye en procesos de meteorización, erosión y la acumulación de depósitos de detritos en los cauces principales.

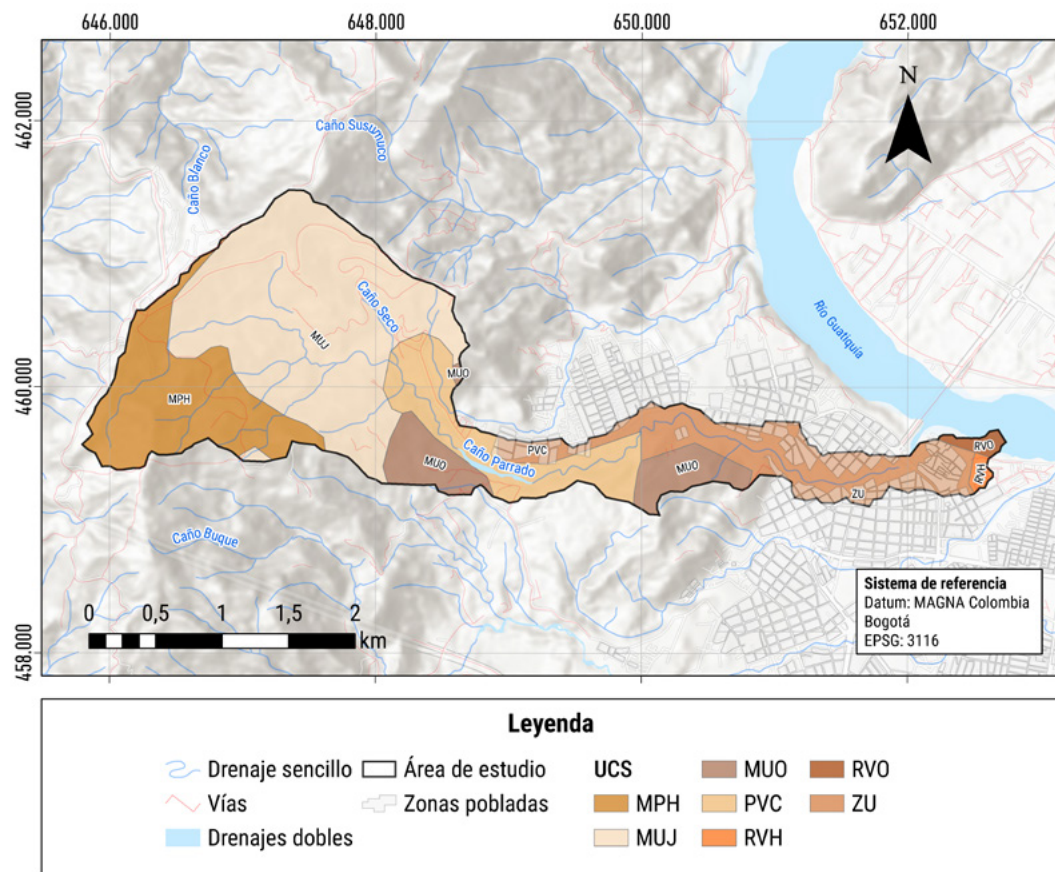
Suelos

En el sector medio de la microcuenca se destacan cuatro unidades distintivas (Figura 11): en el extremo occidental se presentan suelos con clastos de arcillolitas con 18,59% y suelos con clastos de esquistos, filitas y conglomerados en un 41,73%. Estos materiales detríticos corresponden a formaciones geológicas que no afloran en el área, lo que sugiere que son el resultado del transporte (Tabla 9). En el sector central se concentran sedimentos mixtos aluviales alrededor del cauce principal, que cubren un área de 12,54%. Cabe destacar que el cuarto valor en porcentaje con un 16,93% corresponde a zona urbana, la cual ha contribuido a la problemática mediante cambios en la cobertura de tierra, vertimiento de aguas residuales, alteraciones en el cauce, entre otros aspectos. Además, esta zona puede verse afectada por eventos de riesgo asociados a movimientos de masa.

Tabla 9 - Clasificación del suelo según el Sistema Unificado de Clasificación del Suelo (SUCS) en la microcuenca del caño Parrado

ID	UCS	UCS_F	Composición de los clastos presentes en los suelos	Porcentaje	Área (ha)	Área (%)
1	MPH	MPHeñ	Arcillolitas con inclusiones de esquistos.	40,35,25	111,13	18,59
2	MUJ	MUJefñ	Esquistos, filitas y conglomerados brechados.	45,30,25	249,47	41,73
3	MUO	MUOefñ	Areniscas y arcillolitas intercaladas.	40,30,25	0,93	0,16
4	MUO	MUOefñ	Areniscas y arcillolitas intercaladas.	40,30,25	27,16	4,54
5	MUO	MUOefñ	Areniscas y arcillolitas intercaladas.	40,30,25	24,35	4,07
6	PVC	PVCap	Sedimentos mixtos aluviales que cubren depósitos de cantos y gravas bastante alterados.	75,25	74,97	12,54
7	RVH	RVHay	Depósitos mixtos aluviales.	45,35	3,50	0,58
8	RVO	RVOax	Cantos, gravas y arenas aluviales.		5,15	0,86
9	ZU	ZU	Zona urbana	Zona urbana	101,22	16,93
Total					597,88	100,00

Figura 11 - Mapa de suelos según el Sistema Unificado de Clasificación del Suelo (SUCS) presentes en la microcuenca del caño Parrado



Fuente: adaptado de Servicio Geológico Colombiano e IGAC, 2018.

Otros factores

Precipitación

Según Dahal et al. (2008), la incidencia de precipitación es importante en el desarrollo de los movimientos en masa, y se considera en las evaluaciones de susceptibilidad. En la Figura 12 se muestra el mapa de isoyetas, que representa gráficamente la distribución de precipitación en la zona durante el periodo de 1998 a 2010, utilizando datos de precipitación anual de estaciones meteorológicas disponibles. Es importante destacar que el tramo alto de caño Parrado exhibe una mayor intensidad de lluvia, con un intervalo superior a 5.000 mm, abarcando el 35,03% del área de estudio según se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10 - Intervalos de distancia de drenajes

ID	Intervalo (mm)	Número de píxeles	Área (ha)	Área (%)
1	4.348 - 4.400	2.959	46,23	7,73
2	4.400 - 4.500	7.404	115,69	19,35
3	4.500 - 4.600	2.355	36,80	6,15
4	4.600 - 4.700	3.603	56,30	9,41

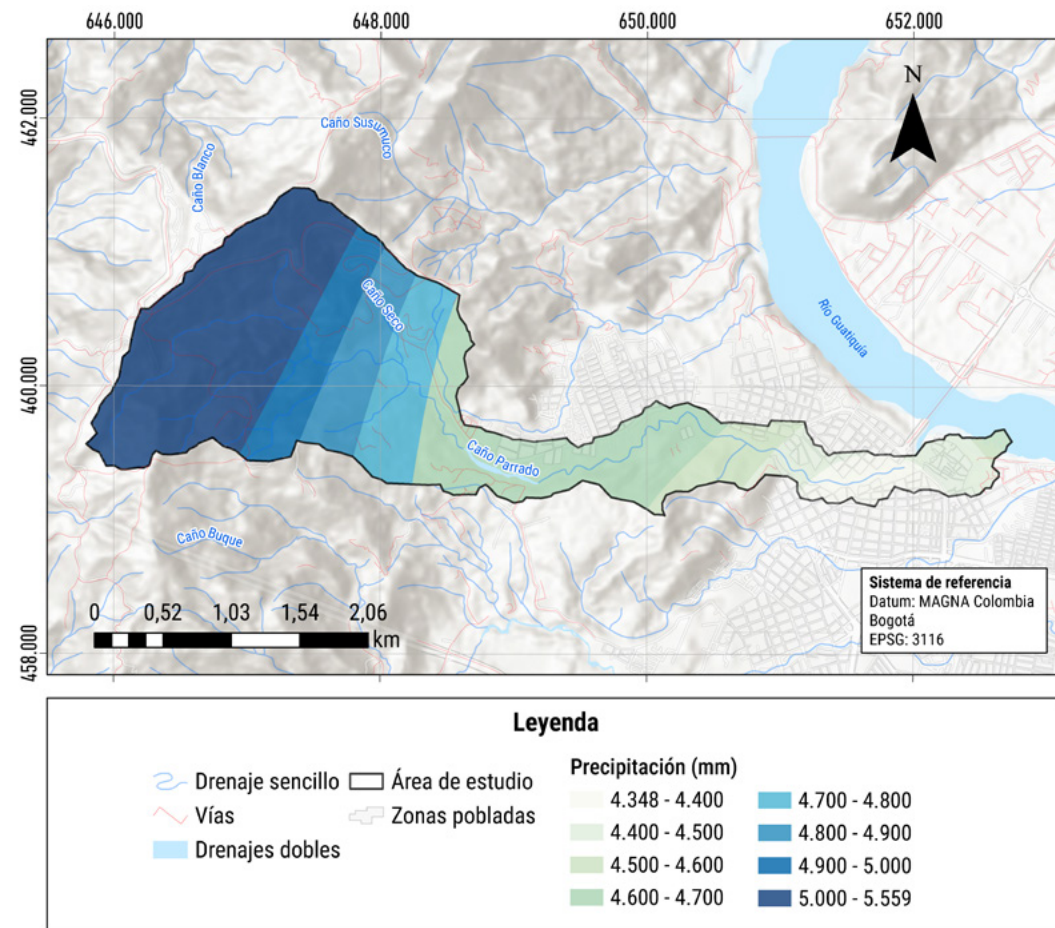
ID	Intervalo (mm)	Número de píxeles	Área (ha)	Área (%)
5	4.700 - 4.800	2.882	45,03	7,53
6	4.800 - 4.900	2.779	43,42	7,2
7	4.900 - 5.000	2.881	45,02	7,53
8	> 5.000	13.406	209,47	35,03
Total		38.269	597,95	100,00

De acuerdo al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM, Villavicencio cuenta con un promedio anual de precipitación de 4383 mm. Esto significa que la microcuenca del caño Parrado registra una precipitación anual que supera este promedio (IDEAM, 2014). Cabe destacar que la lluvia es un agente meteorizante de las rocas, como se evidencio en las areniscas de la Formación Cáqueza.

Sismos

Los sismos afectan el equilibrio de las laderas y ocasionan movimientos en masa, por medio de vibraciones que pueden generar efectos de roturas en el terreno y grandes deformaciones (Chen et al., 2016). Para este caso particular los sismos pueden activar

Figura 12 - Mapa de precipitación anual de caño Parrado (1998-2010)



Fuente: adaptado de Servicio Geológico Colombiano e IGAC, 2018.

sectores localizados en la microcuenca donde la roca se encuentran diaclasadas, con un nivel de meteorización grado IV y pendientes pronunciadas que se localizan al occidente del área de estudio.

Los sismos pueden desencadenar deslizamientos de tierra al sacudir y debilitar el terreno. Las vibraciones sísmicas pueden provocar la ruptura de la cohesión del suelo y desencadenar deslizamientos en pendientes inestables.

Susceptibilidad por movimientos en masa

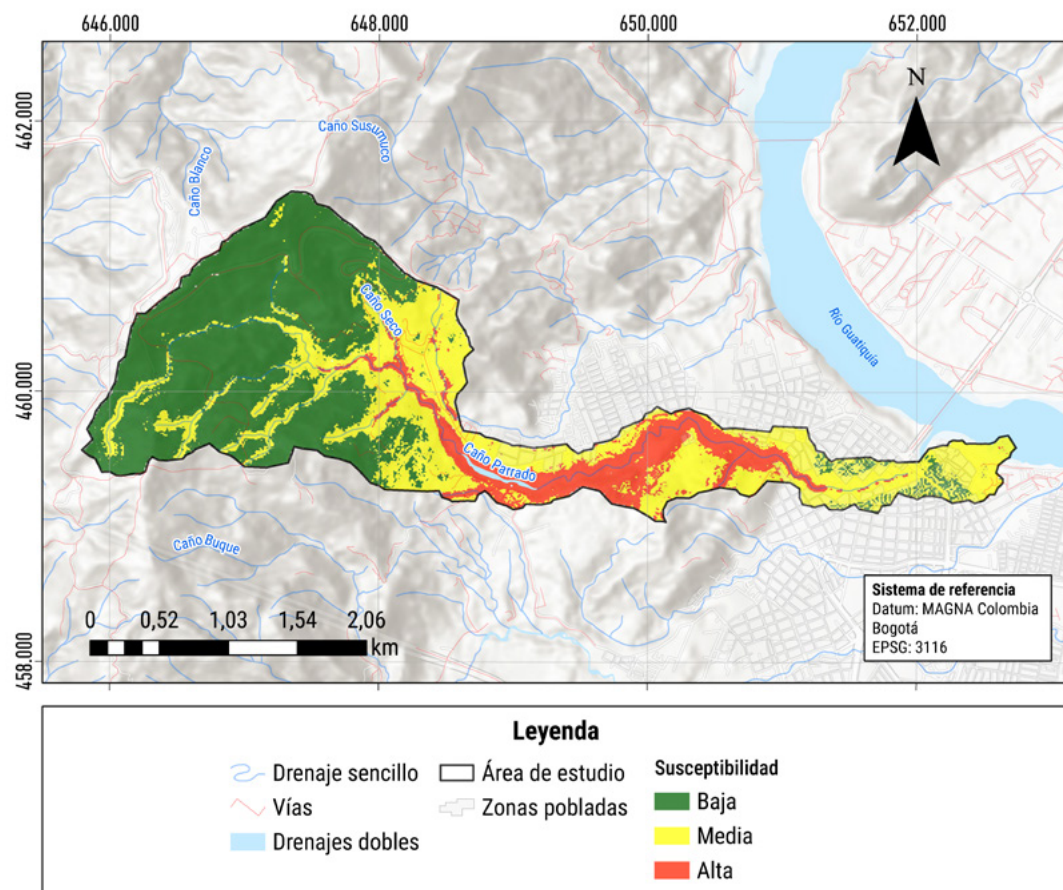
El mapa de susceptibilidad muestra la suma ponderada de todos los factores condicionantes analizados, incluyendo el factor de precipitaciones, siguiendo el método de Peso de Evidencia (WofE). Además, en el análisis de susceptibilidad se consideró el inventario de movimientos de masa, donde el 85% corresponde a deslizamientos. El resultado final es la delimitación espacial de áreas que, debido a sus condiciones naturales y alteraciones humanas, tienen una mayor probabilidad de experimentar movimientos en masa. Estas áreas se han categorizado en tres rangos: alto, medio y bajo (Figura 13).

Empleando el método del peso de la evidencia, se exploraron

varios factores condicionantes, como el contexto geológico, geomorfológico, la cobertura del suelo, el relieve y el uso de la tierra, entre otros. Este análisis llevó a la identificación de áreas con distintos niveles de susceptibilidad: alta, media y baja. La relevancia de examinar estos factores radica en la detección de zonas propensas a movimientos de masa. En este caso particular, se confirma las áreas alta susceptibilidad con los movimientos de masa previamente identificados e inventariados en el sector.

En el caño Parrado, la susceptibilidad alta se localiza principalmente en su zona central, coincidiendo con la presencia de algunos asentamientos informales situados en la ribera norte del caño. Además, la mayoría de los movimientos en masa registrados hasta el momento han ocurrido precisamente en esta área. La alta susceptibilidad está principalmente relacionada con el grado de meteorización de las areniscas de la Formación Cáqueza y los suelos transportados fluvio-torrencialmente del abanico coalescente antiguo, alimentados por los deslizamientos presentes en la ribera del caño. Además, es la zona con mayor intervención humana.

Figura 13 - Mapa de suelos según el Sistema Unificado de Clasificación del Suelo (SUCS) presentes en la microcuenca del caño Parrado



Fuente: adaptado de Servicio Geológico Colombiano e IGAC, 2018.

La susceptibilidad media se localiza en el centro, alrededor de la susceptibilidad alta, al oriente del caño Parrado y al occidente sobre el cauce principal y sus afluentes de este sector. Esta susceptibilidad está influenciada por la geología, específicamente por la presencia de areniscas de las Formaciones Cáqueza y las lutitas de Macanal. En el lado occidental, esta susceptibilidad se correlaciona con el trazo de las fallas El Mirador y la Falla de Bavaria. Además, está relacionada con los tipos de suelos presentes, que incluyen sedimentos aluviales y areniscas resultado de la meteorización de las formaciones mencionadas anteriormente. Hacia el oeste, la susceptibilidad media está asociada con las pendientes, la precipitación y la curvatura del terreno, dominando las zonas convexas localizadas entre los drenajes afluentes, contribuyendo con la erosión y aumentando el riesgo de movimientos de masa, factores que contribuyen al transporte de material en los afluentes. Finalmente, la susceptibilidad baja se presenta al occidente del área, con una presencia espacial del 48,88%.

Conclusiones

Los resultados de la aplicación de la guía metodológica en esta investigación ofrecieron ubicaciones espaciales de las categorías de susceptibilidad coherentes con las condiciones geoambientales de caño Parrado, alineándose con los mapas oficiales del POT 2015-2027. Es importante destacar que el mapa de susceptibilidad generado subraya las posibles atenuaciones en amenazas que enfrenta la población en esta área, cuya ocurrencia podría acarrear consecuencias graves.

Mediante el método del peso de la evidencia, se evaluaron varios factores condicionantes, incluyendo el contexto geológico, geomorfológico, la cobertura de la tierra, el relieve y el uso del suelo, entre otros. Este análisis permitió identificar tres categorías de susceptibilidad: alta, que se concentra en el centro de caño Parrado, donde se encuentran asentamientos informales, cubre el 13,57% del área; media, que abarca la sección centrooriental, correspondiente al 37,55%; y baja, que se extiende hacia el occidente del proyecto, abarca la mayor extensión con un 48,88%.

Los principales factores condicionantes que influyen en la susceptibilidad alta son el grado de meteorización de las rocas presentes en el sector, influenciados por el diaclasamiento de las mismas asociados a los procesos tectónicos de la cordillera oriental, agravándose con el mal uso del suelo donde se ha ubicado barrios informales. Aunque en el sector occidental la susceptibilidad es baja, presenta en los afluentes una susceptibilidad media asociada a las altas pendientes, a las precipitaciones y la curvatura del terreno, correspondiente a zonas convexas localizadas entre los drenajes afluentes, contribuyendo con la erosión y aumentando el riesgo de movimientos de masa.

Para concluir, es crucial llevar a cabo estudios más detallados en los diversos sectores identificados como de "amenaza alta" para movimientos de masa en el POT 2015-2027 de Villavicencio. Esto implica considerar factores desencadenantes como las lluvias y los sismos, dado que esta región de Colombia experimenta períodos de alta intensidad de precipitaciones y se han registrado en los 2023 sismos superficiales de magnitud media.

Referencias

Alcaldía de Villavicencio. (2020). Plan de Desarrollo Villavicencio cambia contigo (2020-2023). <https://historicovillavicencio.gov.co/MiMunicipio/ProgramadeGobierno/Plan%20de%20Desarrollo%20Villavicencio%20Cambia%20Contigo%202020%20-%202023.pdf>

Ardila, N. (2020, agosto 20). Un caño Parrado tiene en riesgo a 22.660 habitantes de Villavicencio. *El Tiempo*. <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/un-cano-parrado-tiene-en-a-habitantes-y-una-via-de-villavicencio-531442>

Brown, E. T. (1981). *Rock Characterization, Testing & Monitoring: ISRM Suggested Methods*. Oxford, New York: Published for the Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics by Pergamon Press.

Chen, T., Niu, R. y Jia, X. (2016). A Comparison of Information Value and Logistic Regression Models in Landslide Susceptibility Mapping by Using GIS. *Environmental Earth Sciences*, 75(10), 867. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5317-y>

Dahal, R. K., Hasegawa, S., Nonomura, A., Yamanaka, M., Dhakal, S. y Paudyal, P. (2008). Predictive modelling of rainfall-induced landslide hazard in the Lesser Himalaya of Nepal based on weights-of-evidence. *Geomorphology*, 102, 496-510. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.05.041>

Gómez, H., y Kavzoglu, T. (2005). Assessment of shallow landslide susceptibility using artificial neural networks in Jabonosa River Basin, Venezuela. *Engineering Geology*, 78(1), 11-27. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.10.004>

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2014). *Cartografía Base Escala 1:500.000* [Mapa]. <https://www.colombiainmapas.gov.co/?e=-82.43784778320864,-0.17644239911865092,-71.23179309571162,9.90326984502256,4686&b=igac&u=0&t=23&servicio=204>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2018). *Cobertura de la Tierra 100K Período 2018*. [Mapa]. <https://visualizador.ideam.gov.co/geonetwork/srv/spa/catalog.search/#/metadata/285c4d0a-6924-42c6-b4d4-6ae2c1aceb5>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2014). *Características climatológicas de ciudades principales y municipios turísticos*. <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418894/Caracter%C3%ADsticas+de+Ciudades+Principales+Y+Municipios+Tur%C3%ADsticos.pdf/c3ca90c8-1072-434a-a235-91baee8c73fc>

Ruiz G. L., Navarro, S. del R., Chaparro, J. L., Gamboa, C. A., Ramírez, K. C., Camargo, B. L., Trejos, G. A. y Pérez, R. (2013). *Las amenazas por movimientos en masa de Colombia, una visión a escala 1:100.000*. Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. <http://repositoriogestiondelriesgo.gov.co/handle/20500.11762/36885>

Santacana, N. (2001). *Análisis de la susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos superficiales y grandes deslizamientos mediante el uso de sistemas de información geográfica: aplicación a la cuenca alta del río Llobregat*. Universitat Politècnica de Catalunya. <https://www.tdx.cat/handle/10803/6213#page=1>

Servicio Geológico Colombiano. (2017). *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa. Escala 1: 25.000*. Servicio Geológico Colombiano. [https://www2.sgc.gov.co/Archivos/GM\(2017\).pdf](https://www2.sgc.gov.co/Archivos/GM(2017).pdf)

Servicio Geológico Colombiano. (2019). *SIMMA - Sistema de Información de Movimientos en Masa*. SIMMA-SGC. Recuperado junio 17, 2024, de <https://simma.sgc.gov.co/#/public/results/>

Servicio Geológico Colombiano e Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2018). *Actualización del estudio de zonificación de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000 y la zonificación de amenaza por movimientos en masa tipo avenida torrencial escala 1:25.000 en el municipio Villavicencio-departamento del Meta*. https://recordcenters.sgc.gov.co/Bz3/639_19_ZonVillavicencio/Documento/PDF/AmenazVillavicencio2018.pdf

Suarez, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos*. <https://www.erosion.com.co/deslizamientos-y-estabilidad-de-taludes-en-zonas-tropicales/?cp=2>

Detección y caracterización de procesos erosivos y movimientos en masa mediante el uso de tecnologías geoespaciales, Salento, Quindío – Colombia

Detection and Characterization of Erosion Processes and Mass Movement Through Geospatial Technologies. Salento, Quindío - Colombia

Seiry Soleny Vargas Tejedor¹ 
 Héctor Jaime López Salgado² 

Resumen

Durante 2019, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi realizó un convenio con la Corporación Autónoma Regional del Quindío cuyo objeto fue “Aunar esfuerzos para la realización de un estudio para la identificación, caracterización y espacialización cartográfica a escala 1:10.000 de los procesos erosivos en la unidad hidrográfica del río Navarco”. Como parte de las actividades, se estableció la necesidad de generar un insumo cartográfico con la información de los procesos erosivos que se presentaban en la cuenca del río Navarco y que pudiera ser incorporado en los diferentes análisis que darían cumplimiento a dicho convenio. Para esto, se plantearon como objetivos determinar los insumos, técnicas, lineamientos de captura y atributos para la identificación y delimitación de dos temáticas: movimientos en masa y erosión; a partir, en primer lugar, del estudio de los conceptos que las definen y enmarcan, lo que incluyó la revisión de varias fuentes de información como: Servicio Geológico Colombiano, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, la Publicación Geológica Multinacional, entre otros; y, en segundo, la generación cartográfica a partir de la interpretación de imágenes de sensores aerotransportados de alta resolución espacial como las cámaras Vexcel y *Sequoia*, usando la estereoscopia digital como técnica principal. La interpretación se realizó para 2009 y 2019, y se usaron aplicaciones móviles para el control en terreno.

Palabras clave:

erosión, estereoscopia, movimientos en masa, sensores remotos.

Cómo citar

Vargas Tejedor, S. S. y López Salgado, H. J. (2024). Detección y caracterización de procesos erosivos y movimientos en masa mediante el uso de tecnologías geoespaciales, Salento, Quindío – Colombia. *Análisis Geográficos*, 57 (1), 44 - 53

¹ Instituto Geográfico Agustín Codazzi. seirvt@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1738-8155>.

² Instituto Geográfico Agustín Codazzi. hector.lopezs@hotmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2965-2562>.

Abstract

During 2019, Geographic Institute Agustín Codazzi entered into an agreement with the Regional Autonomous Corporation of Quindío whose purpose was “Join efforts to carry out a study for the identification, characterization and cartographic spatialization at a scale of 1:10,000 of the erosive processes in the hydrographic unit of the Navarco river”. As part of the activities, the need to generate a cartographic input with information on the erosive processes was determined, that were presented in the Navarco river basin and that could be incorporated into the different analyzes that would comply with said agreement, for this the objectives were set to determine the inputs, techniques, capture guidelines and attributes for the identification and delimitation of two themes: mass movements and erosion. Starting, first of all, from the study of the concepts that define and frame them, which includes the review of various sources of information such as: Colombian Geological Service, Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies, the Multinational Geological Publication among others, and secondly the cartographic generation from the interpretation of images from high spatial resolution airborne sensors such as the Vexcel and *Sequoia* cameras, using stereoscopy. digital as the main technique. The interpretation was carried out for the years 2009 and 2019, and mobile applications were used for field control.

Keyword:

erosion, stereoscopy, mass movements, remote sensing, remote sensing.

Introducción

El proceso metodológico expuesto tuvo como objetivo principal proveer un insumo cartográfico que aportara información para la identificación y caracterización de los procesos erosivos en el área de estudio y que, a su vez, apoyara el proceso de validación de la información de erosión obtenida por método cuantitativo como la ecuación universal de pérdida del suelo USLE, establecida por Wischmeyer y Smith (1978). Cabe mencionar que los resultados que se presentan en el presente artículo corresponden solo al proceso de interpretación digital y que estos no son la totalidad de la información obtenida en el marco del convenio, que incluyó: el índice de erodabilidad inferido a las particularidades de la precipitación, el índice de erosividad relacionado con características edáficas del horizonte A, el factor pendiente, generado a partir del DEM Alos Palsar, el índice de cobertura en función del grado de protección, entre otros, que, en conjunto, determinaron las características de los procesos erosivos en el área.

A partir de dicho objetivo, se identificó que la Subdirección de Agrología del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) venía desarrollando y aplicando metodologías para la obtención de cartografía geomorfológica en algunos departamentos del país mediante la interpretación de insumos de sensores remotos, usando la estereoscopia digital como una de las principales técnicas, con base en estas experiencias, se consideró desarrollar y aplicar un proceso metodológico para la obtención de movimientos en masa (MVM) y erosión en un área de 84 km² localizada en el municipio de Salento, departamento del Quindío, de lo que se obtuvo un inventario de 463 MVM y una zonificación de erosión.

Metodología

Una vez identificado el alcance y propósito del estudio, se plantearon tres líneas principales para la caracterización y el mapeo de los MVM y la erosión: la primera consistió en una revisión y análisis de la información previa disponible para el área y la información por ser capturada en el marco del convenio que

incluyó geomorfología aplicada a levantamientos de suelos de acuerdo con IGAC (2019), suelos, cobertura de la tierra, entre otras, para que, de esta manera, se estructurará el marco biofísico de la zona. La segunda, en la que se identificaron los insumos de sensores remotos disponibles y las técnicas más adecuadas para su mapeo; y la tercera, en la que se realizó una revisión y análisis de metodologías específicas orientadas a la identificación de erosión y MVM, lo que permitió definir los lineamientos conceptuales, criterios de interpretación y criterios cartográficos que se aplicarían en el proceso de detección y caracterización de estos. En la Figura 1 se observa el proceso metodológico seguido.

Área de estudio

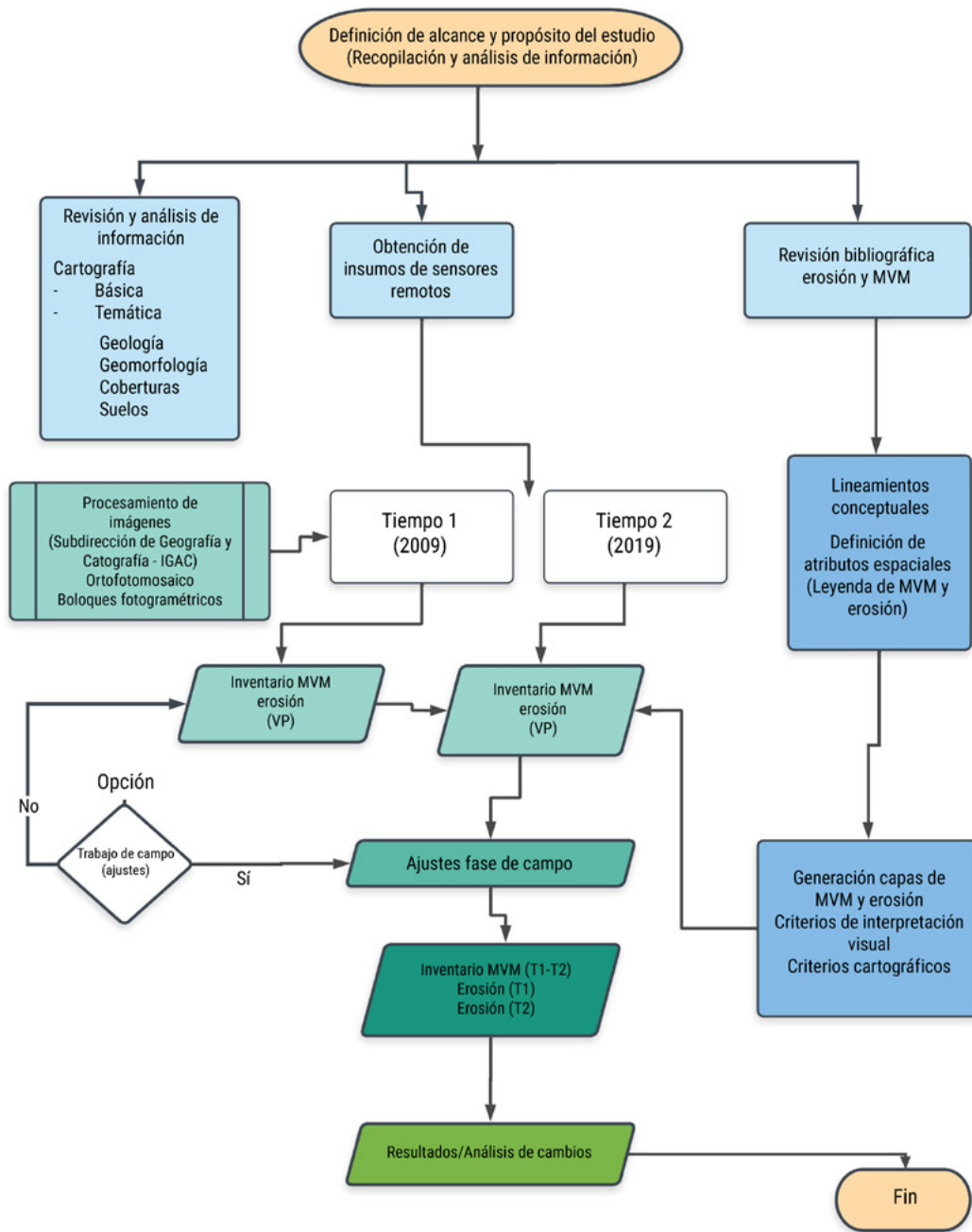
El área de estudio se encuentra ubicada en el municipio de Salento, departamento del Quindío – Colombia. Limita hacia el sur con los municipios de Calarcá (Quindío) y Cajamarca (Tolima), tiene un área aproximada de 80 km² y hace parte de cuenca hidrográfica del río Navarco (Figura 2).

Materiales y métodos

Se utilizaron insumos en 2D y 3D (estereoscopia digital), por lo que se requirió la generación de ortofotomosaicos y bloques fotogramétricos construidos a partir de las fotografías aéreas de la cámara Vexcel Ultracam D³ (Figura 3). Se interpretaron aproximadamente 90 pares estereoscópicos para 2009 y 71 para 2019. Adicionalmente, para el año 2019 se emplearon cuatro ortofotomosaicos de la cámara multiespectral Sequoia y un ortofotomosaico de la cámara Vexcel, insumos generados por la Subdirección de Geografía y Cartografía del IGAC. De manera complementaria, se generaron composiciones en falso color realizadas a partir de los diferentes ortofotomosaicos y, como apoyo, se utilizó el modelo digital de elevación del sensor satelital Alos Palsar, con resolución

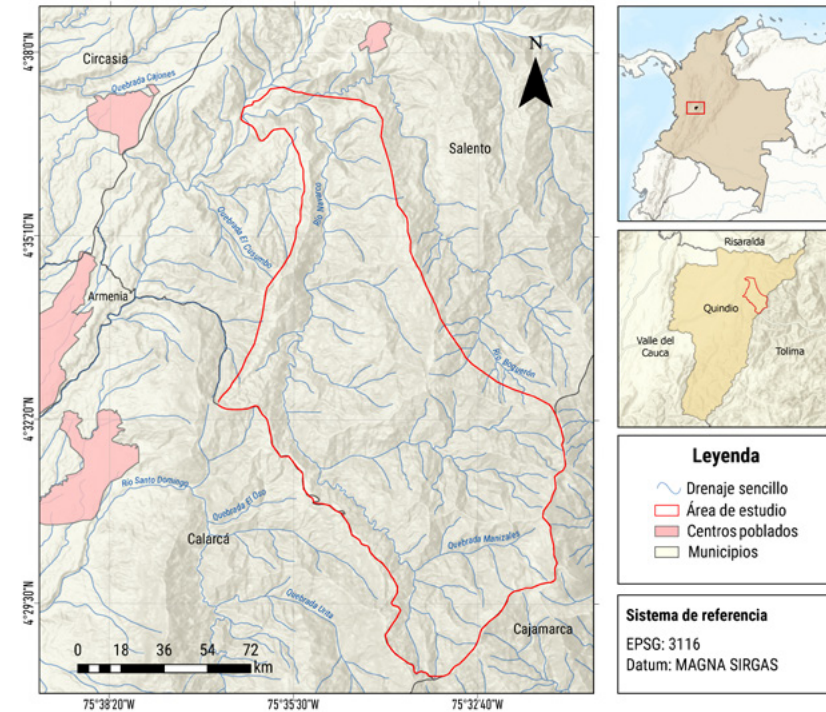
³ Información adicional de las imágenes fuente del ortofotomosaico y bloques fotogramétricos empleados en la interpretación de 2009 pueden ser consultadas en IGAC (2010).

Figura 1 - Diagrama metodológico



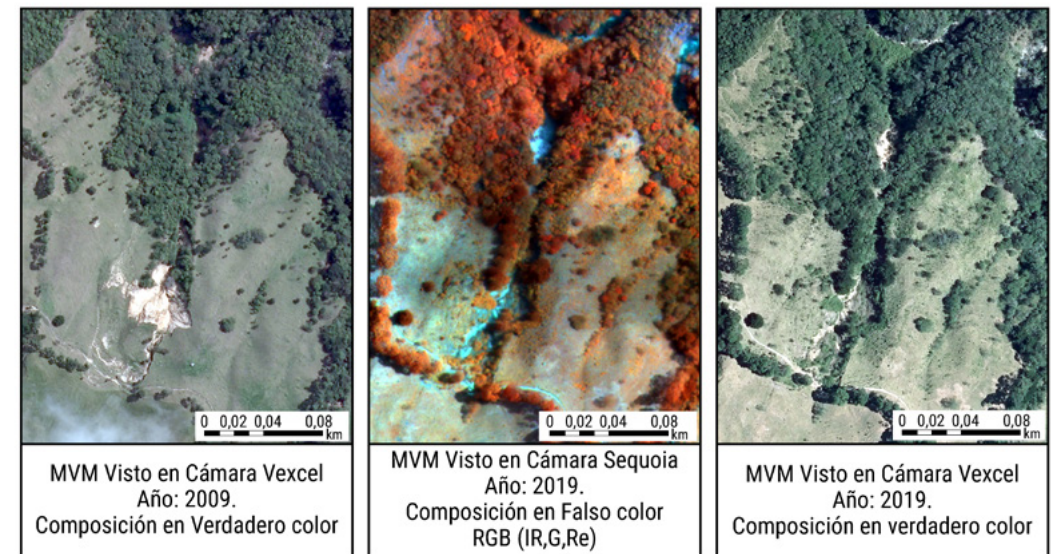
Fuente: adaptado de IGAC y CRQ, 2019.

Figura 2 - Localización área de estudio



Fuente: adaptado de IGAC y CRQ, 2019.

Figura 3 - Detalle de los insumos principales empleados en la captura de MVM y erosión



Fuente: adaptado de IGAC y CRQ, 2019.

Nota: a) MVM visto en cámara Vexcel, año: 2009, composición en verdadero color; b) MVM visto en cámara Sequoia, año: 2019, composición en falso color RGB (IR, G, Re); c) MVM visto en cámara Vexcel, año: 2019, composición en verdadero color.

espacial de 12,5 m y sus productos derivados (por ejemplo, mapas de pendientes y sombras). En la Tabla 1 y Figura 3 se describen las características de los principales insumos utilizados.

Tabla 1 - Características de las imágenes de sensores remotos plataformas aerotransportadas

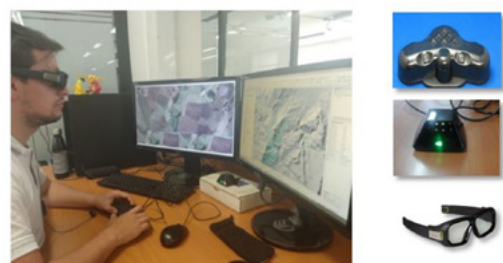
Sensores aerotransportados					
Sensor	Resolución	No. Bandas	Res. Espacial (m)	Año toma de fotografía	Cubrimiento área de estudio
(%)	Muy alta-submétrica	Azul(B), verde(G), rojo(R) e infrarrojo cercano (IR)	0,35 - 0,3	2009	100
				2019	76
Sequonia	Muy alta-submétrica	Verde(G), rojo(R), borde rojo (Re), infrarrojo cercano (IR)	0,49	2019	47

Fuente: adaptado de IGAC y CRQ, 2019.

La interpretación visual se desarrolló en su totalidad de manera digital empleando técnicas de estereoscopia digital principalmente. La estereoscopia es un proceso que se realiza de manera natural cuando un observador mira simultáneamente dos imágenes de un mismo objeto que han sido captadas desde dos posiciones distintas; cada ojo ve una imagen y el resultado de ese proceso es la percepción de la profundidad o tercera dimensión (Quiroga y Morales, 2015), esta percepción de profundidad permitió caracterizar de manera precisa la extensión y cambios morfológicos tanto de los MVM como de la erosión.

En el caso de la interpretación con estereoscopia digital se utilizó la extensión Stereo Analyst, del software ArcGis. En la Figura 4 se observa la estación de trabajo y los elementos empleados para la realización de la interpretación.

Figura 4 - Estación de trabajo para la captura de información con estereoscopia digital



Fuente: Vargas et al., 2020.

Lineamientos conceptuales y cartográficos

Para la captura de los MVM se partió de su morfología típica, en el caso de los deslizamientos desde la corona hasta donde el perímetro y los flancos fueron claramente visibles. Para el caso de los flujos desde el escarpe (área de suministro), hasta el cuerpo (área de depósito) (Figura 5). Para los otros tipos (caídas de roca, reptación entre otros) donde la zona de depósito o de llegada fuera claramente identificada. La geometría bajo la cual se realizó la captura fue de tipo polígono y se representaron todos aquellos movimientos que fueron claramente identificados en los insumos empleados.

Para los MVM, no se determinó una unidad mínima de mapeo, ya que como se indica en (Servicio Geológico Colombiano [SGC], 2017) es necesario representar todos los movimientos identificados en el área, los dominios definidos para caracterizar los MVM se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2 - Intervalos de altura en el mapa de relieve

Edad relativa	Asociación	Fuente	Fecha	Área (ha)	Símbolo	Observación	Característica
Reciente	Aislado				RAT1		
	Canalizado				RCT1		
	Aislado/vía				RAVT1		
	Canalizado/vía				RCVT1		
Antiguo	Aislado		T1 o T2		AA1		
	Canalizado				ACT1		
	Aislado/vía				AAVT1		
	Canalizado/vía				ACVT1		
Relicto	Aislado				SAT1		
	Canalizado				SCT1		
	Aislado/vía				SAVT1		
	Canalizado/vía				SCVT1		

Fuente: adaptado de IGAC y CRQ, 2019.

Para el caso de la erosión se diferenciaron el tipo (origen) y la clase (dominio de la manifestación, Instituto de hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM] y Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales [U.D.C.A], 2015). La geometría bajo la cual se realizó la captura fue de tipo polígono. La unidad mínima cartografiable fue de 1 ha en concordancia con la escala del estudio. Los dominios espaciales definidos para la caracterización y su posterior captura son listados en la Tabla 3.

Tabla 2 - Intervalos de altura en el mapa de relieve

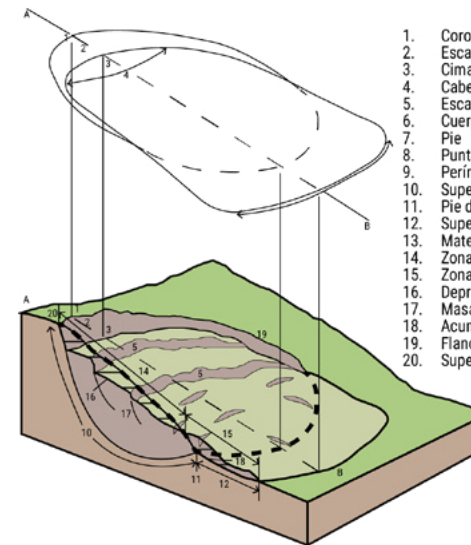
Dominios	Tipo de Erosión	Clase	Fuente	Fecha	Área(ha)	Símbolo
Dominios Base	Héfrica	Laminar				WL
		Cárcavas				WC
		Laminar y surcos				WLS
		Terraceo				WT
		Terraceo y laminar				WTL
		Terraceo y cárcavas				WTC
Dominios complementarios	Sin evidencia					N
	Afloramiento rocoso					AF
	Cuerpo de agua					CA
	Zona de extracción minera					ZA
	Territorios asociados a red vial					ZU

Fuente: adaptado de IGAC y CRQ, 2019.

Almacenamiento y calidad de la información

La información capturada se gestionó en una geodatabase (gdb), bajo la estructura mostrada en la Figura 6. Durante la captura y el almacenamiento se revisaron aspectos relacionados a posibles inconsistencias en los polígonos interpretados, que incluyeron: concordancia entre los dominios definidos (leyenda de interpretación), y los dominios gestionados en la base de datos, polígonos adyacentes con el mismo código, aspectos topológicos, así como áreas mínimas de mapeo.

a) Partes de un MVM tipo deslizamiento



1. Corona
2. Escarpe principal
3. Cima
4. Cabeza
5. Escarpe secundario
6. Cuerpo principal
7. Pie
8. Punta
9. Perímetro del pie
10. Superficie de falla
11. Pie de la superficie de falla
12. Superficie de separación
13. Material desplazado
14. Zona de depresión
15. Zona de acumulación
16. Depresión
17. Masa de deprimida
18. Acumulación
19. Flancos
20. Superficie original del terreno

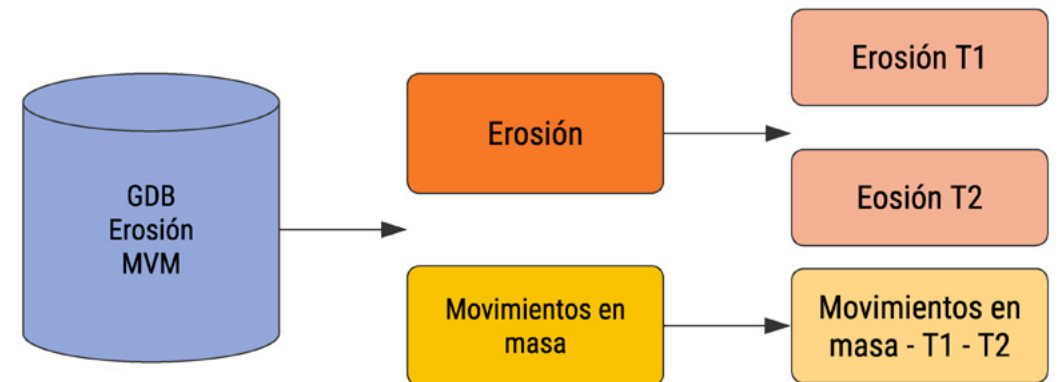
b) Partes de un MVM tipo flujo



Fuente: a) adaptado de Proyecto Multinacional Andino [PMA], 2007; b) adaptado de IGAC y CRQ, 2019, con base en SGC, 2017.

Nota: a) partes de un MVM tipo deslizamiento; b) partes de un MVM tipo flujo.

Figura 6 - Partes de MVM



Fuente: adaptado de IGAC y CRQ, 2019.

Trabajo de campo

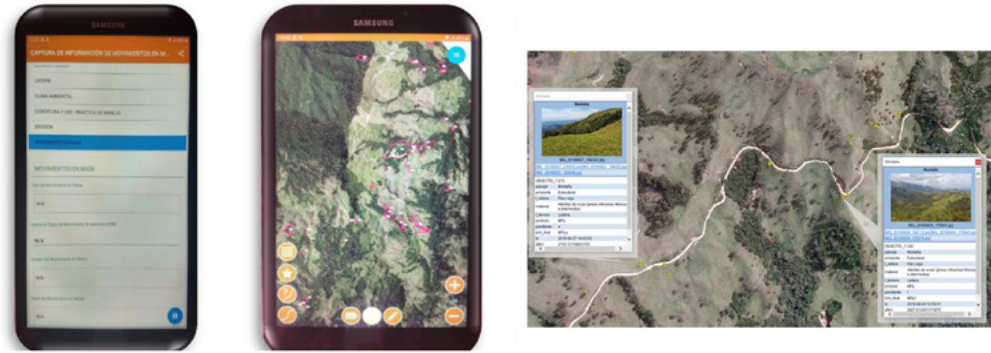
La verificación y ajuste de la delimitación y caracterización de los MVM y la erosión se realizó mediante un control en terreno, ejecutado en noviembre de 2019. Para la captura de la información en campo, se diseñó un formulario ágil y de fácil uso que permitiera recoger los aspectos más importantes con base en los lineamientos conceptuales y atributos definidos; este formulario

recogió parte de la información sugerida en IDEAM, U.D.C.A (2015), y fue desarrollado en la aplicación GvSig Mobile (Figura 7).

En la Figura 8 se muestra el formulario, donde para los dominios como el "tipo" en los MVM, se tomaron los más comunes en Colombia según SGC (2017) y para los dominios de clima ambiental se tomaron los contemplados en IGAC (2014).

En la Figura 8 se muestra el formulario, donde para los dominios

Figura 7 - Dispositivos móviles empleando la aplicación GrSig para la captura de información en campo



Fuente: adaptado de IGAC y CRQ, 2019.

Figura 8 - Formato de captura de información de movimientos en masa y erosión

IGAC INSTITUTO GEOGRÁFICO DE COLOMBIA		FORMATO CAPTURA DE INFORMACIÓN DE MOVIMIENTOS EN MASA Y EROSIÓN PROYECTO NAVARCO		PROYECTO NAVARCO
				FECHA
				2019-12-04
INFORMACIÓN GENERAL				
Descripción por: Geiry Vargas	Nº: 5V-27			
Altitud: 1774	FECHA: 2019-11-15			
Fotografía N° (Cámara Externa): 1679				
GEOMORFOLOGÍA				
Paisaje: Montaña	Tipo de Relieve: Fila y viga			
Forma de Terreno: Ladera				
Pendiente: e	Símbolo: Mide			
% Pendiente Local: 49	Longitud: Larga 100 - 300 metros	Forma: Compleja		
CLIMA AMBIENTAL				
Tipos clima ambiental: Templado, húmedo		Época: Lluviosa		
Observación:				
COBERTURA y USO - PRACTICA DE MANEJO				
Coberturas y Uso: Pastos limpios				
Práctica de manejo: Siembras en contorno-Terrazas				
Observación:				
EROSIÓN				
Tipo: Hídrica	Clase: Terracedo			
Grado: Ligera	Símbolo: N/A			
Profundidad (m): N/A				
Observación:				
MOVIMIENTOS EN MASA				
Tipo: N/A				
Estado: N/A				
Edad: N/A				
Asociación: N/A				
Observación:				

FOTO OBSERVACIÓN DE CAMPO	
Observaciones de la fotografía: Terracedo en ladera de fila y viga, segunda foto. Terrazas de valle estrecho geomorfología	

Fuente: adaptado de IGAC y CRQ, 2019.

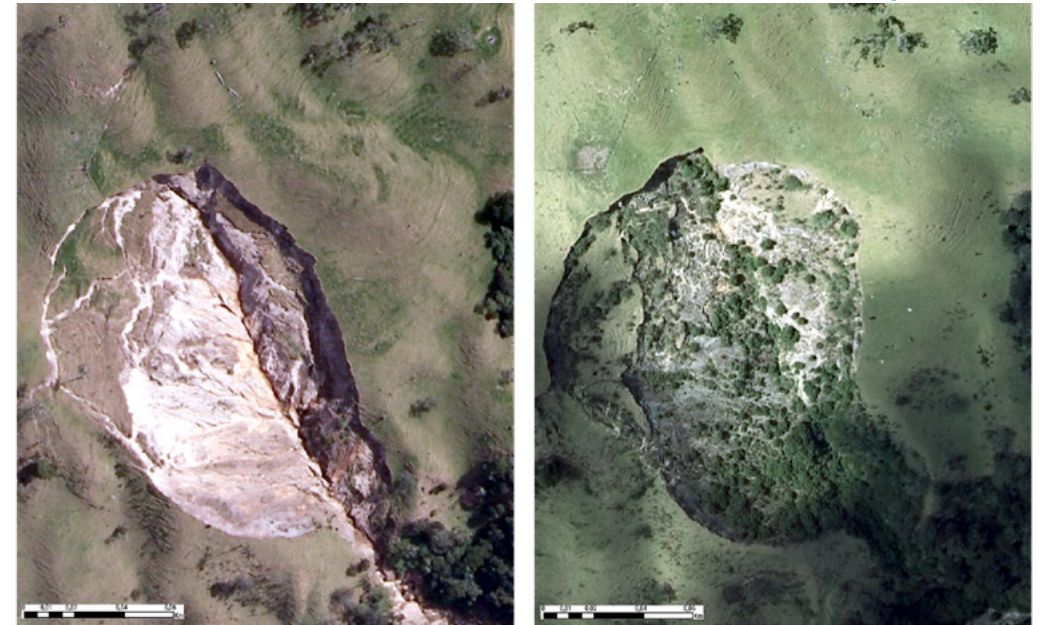
como el "tipo" en los MVM, se tomaron los más comunes en Colombia según SGC (2017) y para los dominios de clima ambiental se tomaron los contemplados en IGAC (2014).

Resultados

Para los MVM se realizó un inventario multitemporal en el cual se identificaron 463 movimientos. La distribución por cada uno de los

dominios establecidos se observa en la Tabla 4. El mayor número pertenecen a MVM antiguos los cuales atienden a la definición dada en SGC (2017) que considera a un movimiento en masa como antiguo si en el análisis multitemporal fue identificado en las imágenes más antiguas disponibles. Algunas características morfológicas de los MVM identificadas son mostradas en la Figura 9.

Figura 9 - MVM de diferentes edades. Fotografías aéreas - cámara Vexcel 2009 y 2019. Composición en verdadero color



Fuente: adaptado de IGAC y CRQ, 2019.

Tabla 4 - Distribución por los dominios establecidos para el inventario de MVM para 2009 y 2019

Edad relativa	Asociación	Fecha	Símbolo	Nº de eventos por edad relativa y asociación
Antiguo	Aislado	2009	AAT1	17
Antiguo	Aislado/Vía	2009	AAVT1	14
Antiguo	Canalizado	2009	ACT1	258
Antiguo	Canalizado/Vía	2009	ACVT1	23
Reciente	Aislado	2019	RAT2	1
Reciente	Aislado/Vía	2019	RAVT2	8
Reciente	Canalizado	2019	RCT2	93
Reciente	Canalizado/Vía	2019	RCVT2	6
Relicto	Aislado	2009	SAT1	5
Relicto	Canalizado	2009	SCT1	32
Relicto	Canalizado/Vía	2009	SCVT1	6
Total				463

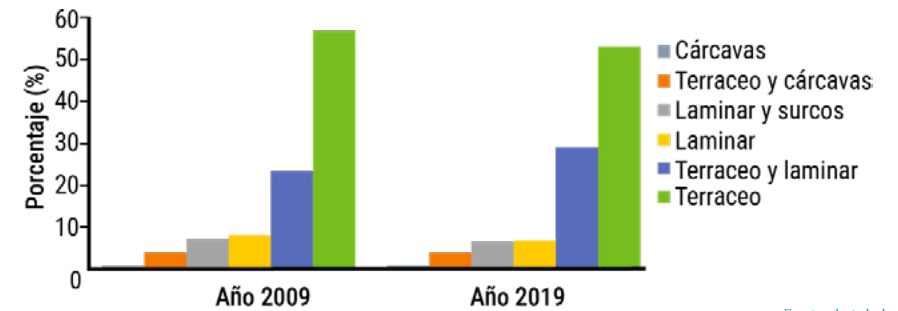
Fuente: adaptado de IGAC y CRQ, 2019.

Para el caso de la temática de erosión se identificaron las zonas sin evidencia del proceso como las de mayor extensión, asociadas principalmente a bosques (de galería, denso y abierto) y a vegetación secundaria o en transición, las zonas que presentan alguna clase de erosión corresponden aproximadamente al 40% del área. En este porcentaje la clase con mayor predominancia es el terracedo, donde dominan los pastos limpios y enmalezados, la vegetación secundaria o en transición y los cultivos permanentes arbóreos donde se realizan buenas prácticas de manejo, mientras que las clases de menor proporción son el terracedo y cárcavas y las cárcavas, tendencias que se mantiene en los dos periodos interpretados (Figura 10).

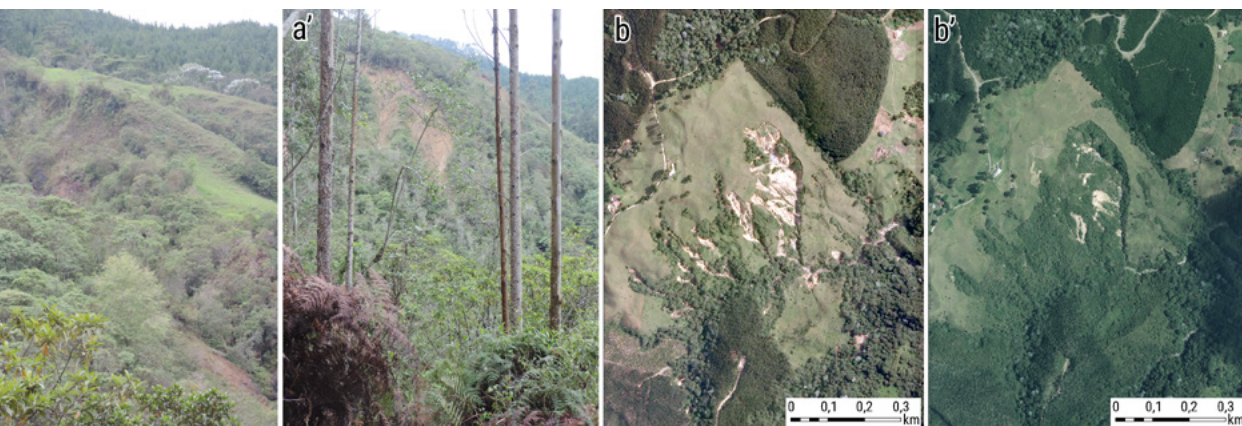
En la Figura 11 se observan algunos ejemplos de los patrones identificados para las clases de erosión en el área de estudio.

Nota. Erosión: hídrica - clase: cárcava a) y a'). Fotografías de la

Figura 9 - Porcentaje de distribución por clase de erosión para 2009 y 2019



Fuente: adaptado de IGAC y CRQ, 2019.

Figura 11 - Ejemplos clases únicas en erosión

Fuente: adaptado de IGAC y CRQ, 2019.

Nota. Erosión: hídrica - clase: cárcava a) y a'). Fotografías de la zona de estudio donde se aprecia la revegetalización de las cárcavas en climas húmedos. Imágenes cámara Vexcel: composición en verdadero color b) año: 2009 b') año: 2019.

Discusión

Los inventarios son un registro ordenado de la localización y las características individuales de una serie de movimientos ocurridos en un área. Según el Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química (INGEOMINAS, 2011; en SGC 2017) la elaboración de un inventario debe permitir entender la ocurrencia de los movimientos en masa y sus características más importantes con base en el alcance y los recursos empleados, existen varios tipos de inventarios donde se incluyen los catálogos, el inventario de información secundaria y el inventario geomorfológico. Para el caso del presente estudio se realizó un inventario de tipo geomorfológico multitemporal, este se llevó a cabo mediante la interpretación de insumos de sensores remotos de alta resolución espacial con dos fechas de toma, donde se identificaron 463 MVM.

En Colombia existe el Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA) del SGC el cual registra, almacena, administra, procesa y visualiza los movimientos en masa en el país, y donde se encuentran registrados tanto el catálogo como los inventarios, este sistema fue consultado durante la ejecución del convenio encontrándose un MVM para el área objeto de estudio.

En el caso de la erosión bajo el esquema metodológico planteado se encontró que en aproximadamente el 40% del área se presenta alguna clase, lo que hace que sea la de mayor predominancia el terraceo, el terraceo y laminar, las clases con menos presencia en el área son la laminar, terraceo y cárcavas y las cárcavas tendencias que se mantiene en los dos periodos interpretados. Es importante mencionar que el IDEAM y U.D.C.A (2015) indican que las manifestaciones en el terreno de los procesos de erosión normalmente no se presentan solas, sino como una combinación, aspectos que también se evidenciaron en el área y que la importancia del entendimiento de la zonificación de acuerdo con los patrones y lineamientos establecidos podrá garantizar la réplica de este tipo de trabajos a otras áreas del país.

En el marco del convenio la erosión fue estimada mediante la ecuación universal de pérdida del suelo USLE, proceso que incluye: la generación del índice de erodabilidad inferido a las particularidades de la precipitación; índice de erosividad relacionado con características edáficas del horizonte A; el factor pendiente, generado a partir del DEM ALOS 12 m, el índice de cobertura en función del grado de protección que estas ofrecen calificadas sobre la aproximación de Corine Land Cover y por último las prácticas de conservación que se realizan en la zona acorde con el uso (IGAC y CRQ, 2019). Los resultados obtenidos a partir de este método y las clases de erosión generadas por la interpretación fueron analizados y comparados, encontrando una relación coincidente entre las clases combinadas definidas por fotointerpretación y las áreas que muestran pérdidas de suelos en el modelo USLE (IGAC y CRQ, 2019).

Por último, mediante el inventario de movimientos en masa y la zonificación de la erosión realizada a partir de insumos de sensores remotos de alta resolución espacial, así como el uso de la estereoscopia digital, la cual es una técnica que permitió identificar características y rasgos que como lo indica Saiz (2010) no se hubieran determinado por medios tradicionales, se logró obtener información con mayor nivel de detalle, y más actualizada que la que se contaba a la fecha de la elaboración del estudio. Sin embargo, el uso de esta información para análisis de otras temáticas como amenazas debe ser complementado.

Conclusiones

Con la propuesta metodológica planteada se logró obtener un análisis multitemporal con información actualizada para 2019; el uso de insumos de alta resolución espacial para los dos periodos de tiempo en conjunto con la estereoscopia digital proporcionó información de los cambios sufridos en los movimientos en masa, así como en las variaciones de los procesos erosivos. El diseño

de formularios de campo, ágiles y acordes con los lineamientos conceptuales definidos para la interpretación permitió un control efectivo en terreno, el presente proyecto se ejecutó en todas sus etapas de manera digital brindando la posibilidad de analizar datos en tiempo real, disminuyendo el esfuerzo y tiempos en el análisis de la información. La cartografía obtenida por interpretación visual fue un insumo importante para la validación de los resultados obtenidos por métodos cuantitativos. De igual forma, este estudio permitió conocer otras aplicaciones a las técnicas de interpretación de insumos de sensores remotos que actualmente utiliza la subdirección de agrología del IGAC.

Referencias

- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM] y Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales [U.D.C.A.]. (2015). *Protocolo para la identificación y evaluación de la degradación de suelos por erosión*. IDEAM-MADS-U.D.C.A. Bogotá DC.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2010). *Ficha Técnica ortofotomosaico Quindío 1:10.000*. Bogotá DC: Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Documento interno.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2014). *Instructivo para los levantamientos de suelos. Manual de códigos*. Bogotá DC: Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Subdirección de Agrología, Documento interno.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi y Corporación Regional del Quindío. (2019). *Estudio de identificación de procesos erosivos en la unidad hidrográfica del río Navarco en el departamento del Quindío. Informe final*. Corporación Regional del Quindío e Instituto Geográfico Agustín Codazzi. <https://crq.gov.co/descarga-de-documentos/page/3/>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2019). *Sistema de clasificación geomorfológica aplicado a los levantamientos de suelos*. Bogotá DC: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Proyecto Multinacional Andino [PMA]. (2007). *Movimientos en masa en la Región Andina: una guía para la evaluación de amenazas. Publicación Geológica Multinacional, N.º 4*. Proyecto Multinacional Andino: geociencias para las comunidades andinas. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20500.12544/2830#files>
- Quiroga, E. y Morales, L. (2015). La estereoscopia, métodos y aplicaciones en diferentes áreas del conocimiento. *Revista Científica General José María Córdova*, 13(16), 201-209.
- Servicio Geológico Colombiano [SGC]. (1982). *Geología y prospección geoquímica de las planchas 244 Ibagué y 263 Ortega departamento del Tolima Colombia escala 1:100.000*. Memoria explicativa. Ibagué
- Servicio Geológico Colombiano. (2017). *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25000*. [https://www2.sgc.gov.co/Archivos/GM\(2017\).pdf](https://www2.sgc.gov.co/Archivos/GM(2017).pdf)
- Servicio Geológico Colombiano. (2017). *Clasificación de movimientos en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia*. <https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Cientificas/NoSeridas/Documents/Clasificacion-MM-Terrenos-Geologicos-Colombia.pdf>

govco/Publicaciones/Cientificas/NoSeridas/Documents/Clasificacion-MM-Terrenos-Geologicos-Colombia.pdf

Saiz, M. (2010). *Reconstrucción tridimensional mediante visión estereó y técnicas de optimización*. Madrid: Universidad Pontificia de Comillas.

Vargas, S., López, H., Cortes, D. y Vargas, W. (2020). Uso de estereoscopia digital para la detección y caracterización de movimientos en masa y procesos erosivos. Caso de estudio: Salento-Quindío [Presentación de la ponencia]. En *14a Semana Técnica de Geología, Ingeniería Geológica y Geociencias (2020)*, Universidad de Pamplona, Plataforma virtual.

Wischmeier, W. y Smith, D. (1978). Predicting Rainfall-Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning. *Agriculture Handbook (AH) 537*. US. Dept. of Agriculture, Washington, DC, USA.

Metodología para la definición de territorios en riesgo a ser deforestados en Colombia^{*}

Methodology for Definition of Territories at Deforestation Risk in Colombia

Andres Felipe Cely¹ 
Lina Paola Arévalo² 
Miguel Serrano López³ 
Camilo Andrés Albarracín⁴ 
Adriana María Vargas⁵ 

Resumen

En las últimas décadas, la deforestación se ha posicionado como una de las preocupaciones ambientales más relevantes, puesto que implica la pérdida de bosques naturales, los cuales son estratégicos para la conservación de la biodiversidad y la amortiguación de los efectos del cambio climático (WWF, 2024). En este sentido y ante la necesidad de contar con datos relevantes que aporten a la lucha contra la deforestación, se planteó una metodología de valoración de territorios en riesgo de deforestación a escala municipal, que incluyó una consulta interinstitucional de variables, búsqueda de información secundaria, y tratamiento estadístico de los datos para la construcción de subíndices de amenaza y vulnerabilidad. La valoración del riesgo se realizó mediante la combinación de una medición de amenaza, que tiene en cuenta la concentración y tendencia de la deforestación, y de una medición de vulnerabilidad bajo cinco categorías. Los principales hallazgos indicaron que las zonas de riesgo alto y muy alto se concentran en la región de transición Orinoquía-Amazónica. El desarrollo de esta metodología permitió integrar indicadores de amenaza y vulnerabilidad para generar un índice de riesgo de deforestación compuesto que permitió tener una visión simultánea de los municipios en los que la intensidad de la deforestación se combina con debilidades/fragilidades del territorio ya sea en el ámbito social, económico, institucional o de seguridad.

Palabras clave:

amenaza, bosques, deforestación, riesgo, vulnerabilidad.

Cómo citar

Cely, A. F., Arévalo, L. P., Serrano López, M., Albarracín, C. A. y Vargas, A. M. (2024). Metodología para la definición de territorios en riesgo a ser deforestados en Colombia. *Análisis Geográficos*, 57(1), 54 - 68.

* Artículo desarrollado en el marco del Programa Territorios Forestales Sostenibles (TEFOS), Convenio de Cooperación entre el Reino Unido, el gobierno de Colombia y la Oficina de las Naciones Unidas Contra la Droga y el Delito (UNODC) 2023. Las opiniones expresadas son responsabilidad del autor, y no constituyen reconocimiento o aceptación por parte de la Organización de Naciones Unidas.

1 Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC). andres.celygonzalez@un.org. ORCID:

2 Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC). lina.arevalo@un.org. ORCID:

3 Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC). miguelserrano2002@yahoo.com. ORCID:

4 Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC). camilo091948@gmail.com. ORCID:

5 Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC). adriana.vargas@un.org. ORCID:

Abstract

In recent decades, deforestation has become one of the most relevant environmental problems, due to the loss of strategic areas for biodiversity conservation and climate change effects mitigation (WWF, 2024). Because of this and the necessity to have relevant data that contributes the oppose against this phenomenon, a methodology for assessing territories at risk of deforestation at a municipal scale was proposed. This methodology included an inter-institutional consultation of variables, secondary information searching, and data statistical treatment to create deforestation threat and vulnerability sub-indices. The risk assessment was made by combining the threat and vulnerability sub-indices that indicate, on one hand, the concentration and trends of deforestation, and on the other, five categories that describe vulnerability conditions. The main findings indicated that high and very high-risk areas were concentrated in the Orinoquía-Amazón transition region. This methodology allowed the integration of threat and vulnerability components to generate a composite deforestation risk index that granted a simultaneous vision of municipalities where deforestation phenomena are more intense, in response to territorial weaknesses/fragilities like social, economic, institutional, or security conditions.

Keyword:

threat, forests, deforestation, risk, vulnerability.

Introducción

La deforestación se entiende como la conversión directa o inducida de la cobertura de bosque a otro tipo de cobertura de la tierra en un periodo de tiempo determinado (González Arenas et al., 2018a). En las últimas décadas, la deforestación ha emergido como uno de los conflictos ambientales más recurrentes y complejos a nivel global, dado que implica la pérdida de uno de los ecosistemas más vitales para la vida humana y la amortiguación de los efectos del cambio climático (World Wildlife Fund [WWF], 2024). Este fenómeno ha sido muy activo en países de la Amazonía, cuya cobertura arbórea se ha reducido en áreas de expansión agrícola y ganadera (Crespo Garay, 2020).

En este sentido, uno de los principales retos, tanto de las autoridades competentes como de los sectores académicos e institucionales relacionados con el monitoreo de bosques, es el de identificar las condiciones de riesgo frente a la deforestación a las que se encuentra expuesto un determinado territorio. Es decir, a la conjunción de situaciones que incrementen o no la probabilidad de que allí se presente una pérdida masiva de bosque. Diversos estudios han trabajado en el tema, entre los que se destacan la caracterización de causas y agentes de transformación del bosque (González Arenas et al., 2018b) y la modelación espacial de la deforestación para las regiones Orinoquía y Amazonía colombiana realizada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), en donde se predicen escenarios futuros de deforestación (González Arenas et al., 2018c).

No obstante, un abordaje desde el punto de vista de la gestión de riesgo implica el reconocimiento de sus dos principales componentes: los factores externos que impulsan el fenómeno, reconocidos como las condiciones de amenaza, así como las condiciones propias del territorio que favorecen su existencia, es decir, la vulnerabilidad (Turner et al., 2003).

La comprensión de estos dos aspectos es clave para explicar el comportamiento del fenómeno, así como para poder definir lineamientos de acción institucional y política pública para la atención de las situaciones que favorecen la deforestación.

En este contexto, y en el marco del proyecto de fortalecimiento de la capacidad institucional en la lucha contra la deforestación en Colombia, apoyado y financiado por el Programa Territorios Forestales Sostenibles (TEFOS) del Reino Unido en cooperación con la Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC) en Colombia, se desarrolló una metodología para la definición de los territorios en riesgo a ser deforestados en Colombia⁶, para la que se calcularon índices de amenaza, vulnerabilidad y riesgo de deforestación a escala municipal.

Materiales y Métodos

La metodología para la definición de territorios en riesgo a ser deforestados en Colombia abarcó las etapas de exploración de variables, recolección de información, análisis de correlación y componentes principales, y determinación de índices de amenaza y vulnerabilidad. A continuación, se expone cada una de estas etapas mencionadas.

Exploración de variables y recolección de información secundaria

Esta etapa inició con un formulario semiestructurado de consulta interinstitucional⁷ que permitió identificar de manera exploratoria las variables asociadas con la deforestación. Los hallazgos se sistematizaron y clasificaron en variables de

6. La metodología planteó incluir variables asociadas al acaparamiento de tierras y las malas prácticas extensivas ganaderas; sin embargo, no fue posible encontrar datos actualizados y con base en métodos estandarizados que permitieran realizar un análisis estadístico y de causalidad adecuados para nutrir un índice de amenaza sólido. Como esto no desconoce que estas actividades puedan aportar en las tendencias de deforestación en el país, fue desarrollado un análisis de trayectorias de las áreas deforestadas para conocer a qué tipo de cobertura del suelo fueron reemplazadas.

7. El formulario fue respondido por doce entidades: Superintendencia de Notariado y Registro (SNR) – Notarías, Corporación Autónoma CDA, Corporación Autónoma Cormacarena, Corporación Autónoma Corpoamazonia, Alcaldía de San Vicente del Caguán, Parques Nacionales Naturales (PNN), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas (SINCHI), Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA), Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), Unidad de Restitución de Tierras (URT), UNODC-SIMCI. Aunque estas entidades se consultaron en la primera fase de la investigación, no hacen parte del desarrollo de esta.

vulnerabilidad y amenaza. Adicionalmente, se realizó un taller interinstitucional con entidades públicas y privadas del sector ambiente para socializar y ajustar los hallazgos, de esta forma se refinaron las variables a utilizar para calcular los índices de los componentes asociados al riesgo de deforestación.

Con las variables identificadas, se procedió a la recolección de información secundaria para cada una de ellas. Para el componente de vulnerabilidad se consolidó una base de datos con veintidós variables (138 subvariables) distribuidas en cinco categorías: social, económica, institucional, de seguridad y territorial (Tabla 1). Para el componente de amenaza, y ante la falta de información estandarizada e histórica de las variables identificadas anteriormente (actividades agropecuarias, cultivos ilícitos, extracción de minerales, etc.), se construyó un índice autorreferido, es decir, que permitiera valorar la amenaza a partir del comportamiento de la deforestación en distintos periodos de tiempo.

Tabla 1 - Variables por categoría, componente de vulnerabilidad

Categoría	Variable	Periodo	Fuente
Social	Nivel de escolaridad	2005 y 2018	Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE)
	Analfabetismo	2006 y 2018	DANE
	Desplazamiento - ocurrencia	1990-2021	Unidad para las víctimas
	Desplazamiento - llegada	1990-2021	Unidad para las víctimas
	Desplazamiento - eventos	1990-2021	Unidad para las víctimas
Económica	Mercado laboral: ocupación formal	2010-2016	Departamento Nacional de Planeación (DNP)-Terridata.
	Actividades económicas - Porcentaje del valor agregado por sector.	2016-2019	DNP/Terridata
	Valor agregado municipal	2011-2020	DANE
	Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI)	2005 y 2018	DANE
	Índice de pobreza multidimensional (IPM)	2018	DANE
	Índice de desempeño fiscal (IDF)	2015-2021	DNP
Institucional	Presencia de sedes de Parques Nacionales Naturales (PNN).	2022	PNN
	Número de sedes de PNN	2022	PNN
	Presencia de sedes fiscalía (relacionadas con investigaciones en deforestación) ⁸ .	2022	Fiscalía General de la Nación (FGN)
	Número de sedes de fiscalía (relacionadas con investigaciones en deforestación).	2022	FGN
	Presencia de las sedes de las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR).	2022	Asociación de Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible (ASOCARS).
	Índice de complejidad municipal para actualización catastral (ICMAC).	2022	DNP
	Medición Desempeño Municipal (MDM)	2016-2020	DNP
	Presencia de Grupos Armados Ilegales	2021	Instituto de Estudios para el Desarrollo y la Paz (In-depaz).
Seguridad	Riesgo de violencia electoral	2007, 2010, 2011, 2014-2018, 2022	Misión de Observación Electoral (MOE)
	Municipios priorizados por el conflicto armado (Programas de Desarrollo con Enfoque Territorial [PDET], Programa Nacional Integral de Sustitución de Cultivos Ilícitos [PNIS]).		Agencia para la Renovación del Territorio (ART)

8 A 2022, las sedes de fiscalía relacionadas con delitos de deforestación son: Dirección de Derechos Humanos eje Ambiental, delegada para las finanzas criminales, Cuerpo Técnico de Investigaciones (CTI), y desde el nivel territorial las direcciones seccionales. Esta información puede cambiar ya que para esa fecha la fiscalía se encontraba en procesos de reestructuración interna.

Definición de los índices de amenaza, vulnerabilidad y riesgo de deforestación

A partir de la información disponible se consolidó una base de datos para los 1.121 municipios del país, intentando asociar para cada una de las variables una medición oficial (o una aproximación de ella) que respondiera a las hipótesis planteadas en los talleres acerca de su relación con la deforestación (capacidad y presencia institucional, mercado laboral, necesidades básicas insatisfechas, actividades económicas extractivas, condiciones de seguridad y accesibilidad, etc.). En esta base de datos se integraron un total de 139 variables relacionadas con los distintos componentes de la vulnerabilidad y la amenaza. Algunos municipios no tenían la totalidad de los datos, por lo que se les imputó la mediana de los valores de otros con la misma categoría municipal.

Análisis de correlación

La refinación de las variables a utilizar para la construcción de los índices, de acuerdo con su relación con la vulnerabilidad y la amenaza de deforestación, se realizó mediante dos tipos de análisis: correlación y componentes principales.

En primer lugar, se estimó la correlación entre todas las variables y la deforestación, para conocer estadísticamente cuáles podrían asociarse a este fenómeno. Este análisis se realizó utilizando el coeficiente de correlación de Spearman (Restrepo y González, 2007)⁹, mediante el cual se determinó cuáles variables tenían una correlación significativa¹⁰ y consistente¹¹ con la deforestación para cada uno de los años.

En este ejercicio solo se sacaron las correlaciones de la deforestación con las variables que estuvieran disponibles para el mismo año o el año anterior. Por ejemplo, no se calculó la correlación entre el índice de Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI) de 2018 con la deforestación de 2010, toda vez que, bajo un marco de causalidad, la pobreza del futuro no tendría por qué ser un factor de riesgo de la deforestación del pasado.

Una vez realizado el análisis de correlación, se descartaron las variables que no mostraron una correlación significativa y consistente con la deforestación, y se procedió a realizar el análisis de componentes principales.

Análisis de Componentes Principales

Luego del análisis de correlación, se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) como segundo nivel de refinamiento. El objetivo de este análisis fue reducir la dimensionalidad del conjunto de datos y, por ende, simplificar su complejidad, manteniendo la información más relevante para el fenómeno en estudio: la deforestación y la vulnerabilidad asociada. Adicionalmente, el ACP estableció un mecanismo para asignar la ponderación de cada variable dentro de su categoría para el índice de vulnerabilidad, conforme a la metodología descrita por Carmona Sánchez et al. (2015).

9 El coeficiente de correlación de Spearman se eligió porque es menos sensible a outliers y no asume una relación lineal entre las variables, lo que lo hace más apropiado en este caso. Se optó por este método sobre Pearson debido a que no se pudieron comprobar los supuestos necesarios para utilizar el más conocido coeficiente de correlación de Pearson.
10 Se calcularon los p-valores del coeficiente de correlación de Spearman mediante Bootstrap para determinar la significancia de la asociación (si estadísticamente era distinta de 0). Bootstrap es un método estadístico utilizado para estimar la distribución de un estadístico mediante la repetición de muestros con reemplazo.
11 Consistente implicaba que no solo todos los coeficientes de correlación fueran significativos para la variable analizada y la deforestación, sino que también el signo de esta correlación (positivo o negativo) fuera el mismo en la mayoría de los casos.

Para llevar a cabo el ACP, se estandarizaron las variables para evitar cualquier problema que pudiera surgir debido a las diferencias en las escalas de las variables¹². Los componentes principales resultantes capturaron la mayor parte de la variabilidad presente en los datos originales, permitiendo asignar pesos específicos a cada variable de manera más efectiva.

Para asegurar la robustez del análisis, se retuvieron suficientes componentes principales como para explicar, al menos el 75% de la variabilidad total en los datos. Esta estrategia permitió tanto simplificar la estructura del conjunto de datos como capturar la máxima cantidad de información relevante.

Determinación de variables de amenaza

Tomando como referente las limitaciones para incluir variables de amenaza, el enfoque para la construcción de este índice fue ajustado mediante una propuesta de aproximación al fenómeno que solo dependiera de la propia deforestación (un índice autorreferido). Por este motivo, el índice de amenaza por deforestación se construyó a partir de dos subcomponentes: *Concentración y Tendencia* del fenómeno. El índice se expresó como una adición de los dos subcomponentes de la siguiente forma:

$$IA_{it} = F2_{it} * (1 + \widetilde{F3}_{it}) \quad (1)$$

Donde: IA_{it} es el índice de Amenaza para el municipio i en el año t , $F2_{it}$ es el subcomponente de Concentración para el municipio i en el año t , y, $F3_{it}$ es el subcomponente de Tendencia para el municipio i en el año t .

A su vez, el subcomponente de Concentración se construyó como:

$$F2_{it} = \frac{MADef_{it}}{\text{Max}_{i=1, \dots, n} (MADef_{it})} \quad (2)$$

Donde: $MADef_{it} = \frac{Def_{it} + Def_{i,t-1} + Def_{i,t-2}}{3}$, es el promedio de la deforestación de los últimos tres años para el municipio i en el año t .

Y el subcomponente de Tendencia se construyó como

$$F3_{it} = \frac{\Delta MADef_{it}}{\text{Max}_{i=1, \dots, n} (|\Delta MADef_{it}|)} \quad (3)$$

Donde: $\Delta MADef_{it} = MADef_{it} - MADef_{i,t-1}$, es la diferencia entre el promedio móvil de la deforestación de los últimos tres años para el municipio en los años t y $t-1$.

Con base en lo anterior, el cálculo de este índice generó valores de *amenaza residual* en los municipios que, aunque tuvieron deforestación en los últimos tres años, no reportaron deforestación en el último año evaluado (2020-2021).

Determinación de variables de vulnerabilidad

Durante la construcción del panel de datos, se identificó que las variables disponibles para el índice de vulnerabilidad se presentaban en tres formas: (i) dato censal, (ii) dato anual, (iii) dato único. En el caso de datos censales, los valores fueron im-

12 La estandarización es un proceso común en análisis multivariados que busca poner todas las variables en una misma escala para permitir comparaciones justas.

putados desde el período inicial hasta el año anterior a la nueva medición. Para los datos anuales, se emplearon tal como fueron reportados por las instituciones pertinentes. Los datos únicos se usaron de manera homogénea para imputar el valor en los períodos anteriores y posteriores.

Posterior a este proceso de imputación, se surtieron los análisis de correlación y ACP descritos anteriormente. Como resultado del análisis de correlación se determinó que, del total de variables iniciales, 47 cumplieron con el criterio de evaluación, lo que originó un nuevo conjunto de variables correlacionadas entre sí, para posteriormente realizar el ACP.

Para construir un índice sintético de vulnerabilidad basado en datos numéricos y continuos significativamente correlacionados con la deforestación, la metodología propuesta abordó el análisis por categorías: social, institucional, seguridad, económico y territorial. Como referente se consultaron dos ejercicios donde se establecieron las bases para el cálculo de un índice sintético, el primero orientado a la tipificación de categorías municipales (Carmona et al., 2015) y el segundo propuesto para la definición de la vulnerabilidad municipal ante el establecimiento de cultivos de coca (Lombana, 2020).

El primer paso en la preparación de las variables fue asegurarse que todas estuvieran alineadas en la misma dirección. En otras palabras, un aumento en el valor de una variable debía corresponder a un aumento en la vulnerabilidad y viceversa.

Una vez identificadas las variables significativas y consistentes y después de realizar el ACP para cada categoría, la contribución de cada variable al subíndice de cada categoría se calculó a partir de las cargas factoriales. Estas cargas fueron elevadas al cuadrado y sumadas para obtener la comunalidad¹³ de cada variable. En este análisis, las ponderaciones o proporciones de cada variable en el índice sintético final se determinaron en función de estas comunalidades.

Por último, estas variables sintéticas fueron agregadas para formar el índice sintético final. Para ello, todas las variables sintéticas fueron reescaladas a valores entre 0 y 1, para asegurar la igualdad de peso entre las categorías. El índice sintético final se calculó como un promedio simple de estas variables reescaladas.

El proceso detallado anteriormente aseguró que el índice sintético de vulnerabilidad representaba adecuadamente la información contenida en todas las variables y categorías. Al mismo tiempo, se mantuvo la coherencia y la interpretación intuitiva del índice, alineado con la dirección de las variables y ponderado de acuerdo con su relevancia, medida por su comunalidad.

Una vez se determinaron y calcularon los subíndices para cada una de las cinco categorías, el índice final de vulnerabilidad se construyó como una medida compuesta de estas. Así, la vulnerabilidad se entendió como la sumatoria de las distintas categorías que la componen.

Formalmente, el índice de vulnerabilidad para el municipio i en el período t se expresó matemáticamente como:

$$Vulnerabilidad_{it} = W_1 Social + W_2 Económica + W_3 Institucional + W_4 Seguridad + W_5 Territorial \quad (4)$$

13 La comunalidad es una medida de la varianza total de una variable explicada por los componentes principales. De esta forma, las variables con mayor comunalidad en los primeros componentes seleccionados, iba a tener una ponderación mayor, pues describen relativamente mejor la categoría de análisis o, en otros términos, condensan de una mejor forma el fenómeno.

En donde W representa el peso asignado a cada categoría. En el contexto de esta metodología, se asumió un peso igual para todas las categorías, implicando que cada subíndice contribuye equitativamente al índice final de vulnerabilidad. Por lo tanto, el índice de vulnerabilidad también puede ser expresado como el promedio de los subíndices, es decir:

$$IV_{it} = \sum_{k=1}^5 \frac{Subíndice_{ik}}{5} \quad (5)$$

Esto reflejó que la medida final de vulnerabilidad es la media aritmética de los subíndices de las cinco categorías. Es importante destacar que, aunque los subíndices son ponderados igualmente, las variables dentro de cada subíndice no lo son necesariamente, ya que su contribución se determinó a través de su comunalidad en el análisis de componentes principales.

Definición del índice de riesgo de deforestación

Una vez definidos los índices de amenaza y vulnerabilidad, y reconociendo que la materialización del riesgo es producto de la interacción entre sus variables, el cálculo del índice de riesgo se expresó matemáticamente de la siguiente manera:

$$IR_{it} = IA_{it} * IV_{it} \quad (6)$$

Donde IA_{it} representa el índice de amenaza de un municipio i para un año t e IV_{it} representa el índice de vulnerabilidad para el mismo municipio y año.

Reescalamiento de los índices

Para cada uno de los componentes del riesgo, amenaza y vulnerabilidad, así como para sus subcomponentes (amenaza: área municipal deforestada y tendencia; vulnerabilidad: social, institucional, seguridad, económico y territorial), se utilizó un proceso de reescalamiento que facilitó la comparación y el análisis. Por tanto, se aplicó un reescalado Min-Max para transformar los índices al rango de 0 a 1. El reescalado Min-Max¹⁴ es una técnica de normalización que transforma los datos a una escala común sin distorsionar las diferencias en los rangos de valores. Se realiza utilizando la fórmula:

$$X_{rescalado} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (7)$$

Donde X es el valor original, X_{min} es el valor mínimo en el conjunto de datos y X_{max} es el valor máximo. Al restar X_{min} del valor original y dividir por el rango de valores ($X_{max} - X_{min}$), se garantiza que los valores reescalados estarán entre 0 y 1.

Este proceso fue aplicado a los índices finales para asegurar que todos los índices estuvieran en la misma escala. Este reescalado facilitó las comparaciones directas entre los índices y permitió una interpretación más sencilla y clara de los resultados.

Una vez que los índices fueron reescalados, se procedió a definir intervalos armónicos dentro de este rango, lo que permitió agrupar y clasificar los municipios.

Construcción de los intervalos armónicos

Para el análisis intertemporal de los índices de amenaza, vulnerabilidad y riesgo, así como de sus subcomponentes, en el periodo

2014-2021, se utilizó el método de *Natural Breaks* (Jenks, 1967) para generar intervalos de clasificación. Este método es ampliamente reconocido en el análisis de datos espaciales y se utiliza para agrupar observaciones en categorías de manera que la varianza interna de los datos en cada grupo sea minimizada y la varianza entre grupos sea maximizada. En este caso, se generaron cuatro cortes a través de este método cada año, para cada uno de los índices que, junto con un mínimo (0) y máximo (1) predefinido por el método de reescalamiento, dio lugar a la formación de cinco grupos.

Luego, para cada año ($t=2014, \dots, 2021$) se definió un conjunto de puntos de corte ($k=1,2,3,4$) para definir 5 clases que, en conjunto, se puede definir como $C_{k,t}$, refiriéndonos al punto de corte k , en el año t .

En vista de que se requería un mecanismo que permitiera la comparabilidad de los datos a lo largo del tiempo, se optó por la construcción de intervalos armónicos. Esto implicó calcular el promedio de los puntos de corte generados por *Natural Breaks* para cada uno de los años, lo que resultó en un único punto de corte por cada intervalo, desde el primero hasta el cuarto. Este procedimiento se llevó a cabo para garantizar que las clases fueran constantes a lo largo del tiempo, lo que permitió una interpretación coherente y comparable a lo largo de los años estudiados. En la Tabla 2 se sintetiza la metodología descrita, donde se definieron los cortes de cada índice.

Tabla 2 - Construcción de intervalos armónicos

Año	Muy baja/o	Baja/o	Media/o	Alta/o	Muy alta/o
2014	0	$C_{1,2014}$	$C_{2,2014}$	$C_{3,2014}$	$C_{4,2014}$
2015	0	$C_{1,2015}$	$C_{2,2015}$	$C_{3,2015}$	$C_{4,2015}$
2016	0	$C_{1,2016}$	$C_{2,2016}$	$C_{3,2016}$	$C_{4,2016}$
2017	0	$C_{1,2017}$	$C_{2,2017}$	$C_{3,2017}$	$C_{4,2017}$
2018	0	$C_{1,2018}$	$C_{2,2018}$	$C_{3,2018}$	$C_{4,2018}$
2019	0	$C_{1,2019}$	$C_{2,2019}$	$C_{3,2019}$	$C_{4,2019}$
2020	0	$C_{1,2020}$	$C_{2,2020}$	$C_{3,2020}$	$C_{4,2020}$
2021	0	$C_{1,2021}$	$C_{2,2021}$	$C_{3,2021}$	$C_{4,2021}$
Intervalo armónico	0	$\sum_{t=2014}^{2021} \frac{C_{1t}}{8}$	$\sum_{t=2014}^{2021} \frac{C_{2t}}{8}$	$\sum_{t=2014}^{2021} \frac{C_{3t}}{8}$	$\sum_{t=2014}^{2021} \frac{C_{4t}}{8}$

Para cada año, se aplica individualmente la metodología de *Natural Breaks*, obteniendo los cuatro cortes (más o y 1). Por ejemplo, para el 2014, se obtendría el conjunto de cortes $\{0, C_{1,2014}, C_{2,2014}, C_{3,2014}, C_{4,2014}, 1\}$, los cuales definirían las cinco clases.

Sin embargo, con la intención de presentar mapas que sean comparables entre sí, se requiere un único conjunto de cortes, y es este el que se define como los intervalos armónicos, definidos en la última fila de la Tabla 2. Este conjunto define los cortes como el promedio, para cada corte, de los resultados obtenidos individualmente en cada año. Por ejemplo, el $C_{1,1}$ del intervalo armónico estará definido por el promedio de los $C_{1,t}$ de todos los años, es decir, como $\sum_{t=2014}^{2021} \frac{C_{1t}}{8}$.

Finalmente, el conjunto de cortes armonizados para presentar los mapas de uno de los indicadores será el definido por $\{0, \sum_{t=2014}^{2021} \frac{C_{1t}}{8}, \sum_{t=2014}^{2021} \frac{C_{2t}}{8}, \sum_{t=2014}^{2021} \frac{C_{3t}}{8}, \sum_{t=2014}^{2021} \frac{C_{4t}}{8}, 1\}$.

En general, esta metodología es apropiada para asegurar la comparabilidad temporal de los datos. Al utilizar promedios de puntos de corte a lo largo de varios años, se logró una mayor estabilidad en la clasificación de los datos, mitigando las fluctuaciones anuales y permitiendo un análisis más coherente.

Resultados del índice de riesgo de deforestación municipal

A continuación, se presentan los resultados del análisis de riesgo de deforestación a escala municipal, que incluyen, en primer lugar, la valoración discriminada de sus componentes de amenaza y vulnerabilidad, y, en segundo lugar, el riesgo resultante de la combinación de estos componentes.

Amenaza de deforestación por municipio

El cálculo de un índice para establecer el grado de amenaza a la deforestación debería poder incluir componentes asociados a los principales motores de deforestación como la ganadería y la agricultura, los cultivos ilícitos, la minería, el desarrollo de infraestructura, entre otras variables¹⁵. No obstante, al no existir información lo suficientemente detallada, rigurosa y periódica que permitiera su inclusión en un índice nacional de amenaza por deforestación, se decidió cuantificar la amenaza mediante un índice autorreferido, esto es, explicado por el comportamiento del fenómeno en sí mismo, en donde las variables se relacionaron con la concentración y la tendencia de la deforestación en un territorio particular, que para este caso fue el municipio. Así mismo, y de manera paralela, se realizó un análisis de trayectorias de los lotes deforestados, con el ánimo de buscar indicios sobre la incidencia de actividades antrópicas en el proceso de deforestación, tales como cultivos ilícitos y minería, así como su comportamiento y distribución geográfica a lo largo del tiempo. Dicho análisis no se incluyó dentro del índice, pero fue útil a la luz de la discusión y análisis de los resultados y se explica más adelante en este documento.

La valoración del índice de amenaza a partir de la concentración y tendencia de la deforestación presentó una escala normalizada de 0 a 1, donde los valores cercanos a uno indicaron mayor nivel de amenaza, mientras que los que se aproximan a cero indicaron menor nivel (Tabla 3).

Tabla 3 - Rangos de valoración del índice de amenaza de deforestación

Amenaza	Índice (rango)
Muy baja	0,00 - 0,03
Baja	0,03 - 0,12
Media	0,12 - 0,30
Alta	0,30 - 0,59
Muy alta	0,59 - 1,00

Para 2021, 706 municipios presentaron algún nivel de amenaza, lo que corresponde a 64 municipios menos que en 2020. Los municipios con mayores índices de amenaza fueron en su orden: Cartagena del Chairá, Mapiripán, San Vicente del Caguán, Tibú, San José del Guaviare y La Macarena, todos con valores muy altos (Tabla 4).

Tabla 4 - Top quince de municipios con mayor índice de amenaza de deforestación, 2021

Departamento	Municipio	Índice amenaza 2021	Rango amenaza 2021	Posición 2021	Índice amenaza 2020	Rango amenaza 2020	Posición 2020
Caquetá	Cartagena del Chairá	1,00	Muy alta	1	0,69	Muy alta	4
Meta	Mapiripán	0,94	Muy alta	2	0,70	Muy alta	3

15 En el proceso de definición de la metodología del índice de riesgo de deforestación, se realizaron análisis espaciales con el fin de tener una aproximación de la relación entre deforestación y coberturas de la tierra, cultivos de coca y explotación de oro de aluvión.

Departamento	Municipio	Índice amenaza 2021	Rango amenaza 2021	Posición 2021	Índice amenaza 2020	Rango amenaza 2020	Posición 2020
Caquetá	San Vicente del Caguán	0,84	Muy alta	3	0,66	Muy alta	5
Norte de Santander	Tibú	0,70	Muy alta	4	0,51	Alta	6
Guaviare	San José del Guaviare	0,70	Muy alta	5	0,71	Muy alta	2
Meta	La Macarena	0,60	Muy alta	6	1,00	Muy alta	1
Guaviare	El Retorno	0,41	Alta	7	0,48	Alta	7
Caquetá	Solano	0,38	Alta	8	0,36	Alta	11
Guaviare	Calamar	0,38	Alta	9	0,47	Alta	8
Putumayo	Puerto Guzmán	0,33	Alta	10	0,41	Alta	9
Meta	La Uribe	0,33	Alta	11	0,30	Alta	12
Meta	Vista Hermosa	0,31	Alta	12	0,25	Media	15
Vichada	Cumaribo	0,30	Alta	13	0,39	Alta	10
Choco	Risusio	0,29	Media	14	0,27	Media	13
Putumayo	Puerto Leguizamo	0,25	Media	15	0,22	Media	16

Al realizar una comparación con respecto al índice de amenaza en 2020, se evidenció que los municipios de Cartagena del Chairá, Mapiripán, San Vicente del Caguán, San José del Guaviare y La Macarena mantuvieron su nivel de amenaza en muy alta. Por otra parte, 46 municipios cambiaron de categoría de amenaza, tres municipios bajaron su nivel al pasar de categoría baja a muy baja (Puerto Rico y La Montañita en Caquetá, y Cacahual en Guainía). En contraste, nueve municipios aumentaron su nivel de amenaza, destacándose Tibú en Norte de Santander, que pasó de amenaza alta a muy alta; Vista Hermosa en Meta que pasó de media a alta, y, finalmente, Miraflores en Guaviare que pasó de baja a media. Adicionalmente, 34 municipios sin amenaza en 2020 fueron categorizados con amenaza muy baja en 2021¹⁶. Por otra parte, 99 municipios con amenaza muy baja en 2020 pasaron a no tener amenaza en 2021¹⁷.

La distribución espacial del índice señaló un núcleo principal en el área de transición amazónica como aquella de mayor amenaza. De hecho, los municipios de Cartagena del Chairá, Mapiripán, La Macarena, San Vicente del Caguán y San José del Guaviare fueron los de mayor grado de amenaza en el país, seguidos por los municipios amazónicos circundantes. Estos territorios se caracterizan por su diversidad biológica y cultural con presencia de Parques Nacionales Naturales como la Serranía de Chiribiquete, Sierra de la Macarena, Tinigua, Cordillera de los Picachos y Nukak, y diversos resguardos indígenas como Barranco Colorado, Caño Jabón, Morichal Viejo, Santa Rosa, Cerro Cucuy, Santa Cruz, Caño Danta, Nukak-Maku, Laguna Araguato y Barranco Ceiba, Cachivera de Nare, Llanos del Yarí - Yaguará II, El Itilla, Caño Negro, La Sal, Caño Ovejas (Betania Corocito), La Asunción, Macuare, La Fuga, Naexal Lajt del Pueblo Jiw, entre otros. Se debe mencionar que en estas zonas interactúan una serie de situaciones que favorecen el fenómeno de la deforestación: colonización, expansión ganadera, presencia de actividades ilícitas, presencia histórica de grupos armados ilegales o falta de información catastral. Así mismo, convergen con áreas de manejo y reglamentación especial como Parques Nacionales Naturales, Antiguos Espacios Territoriales de Capacitación y Reincorporación y resguardos indígenas.

Por otra parte, Tibú en Norte de Santander registró una amenaza

16 Los 34 municipios hacen referencia a aquellos que para 2020 llevaban tres años consecutivos o más sin reportes de área deforestada y en 2021 reportaron nuevamente deforestación.

17 Los 99 municipios hacen referencia a aquellos que en 2021 completaron tres años consecutivos sin reportes de deforestación.

muy alta de deforestación. Este municipio incrementó su nivel de amenaza en los últimos tres años, lo que podría generar una alerta para la creación de estrategias de contención del fenómeno. De hecho, según el análisis de trayectorias realizado sobre los lotes deforestados, fue el municipio con la más alta relación de deforestación por cultivos de coca. Igualmente, llamó la atención Riosucio en Chocó, con una amenaza media que se mantuvo constante durante los últimos años.

Como complemento del análisis anterior, al revisar el comportamiento de la amenaza durante los últimos cinco años se observó como en San Vicente del Caguán, Cartagena del Chairá y San José del Guaviare se mantuvo el grado de amenaza en muy alta, mientras que en los municipios circundantes a ellos la amenaza se iba incrementando con los años. Por otra parte, se evidenció como la región del Magdalena Medio entre Antioquia, Santander y Bolívar, así como el departamento de Arauca y el sur de la región Pacífica, con menores concentraciones de amenaza, fueron presentando incremento en este periodo. En contraste, algunos municipios cordilleranos de Nariño, Cauca, Cundinamarca, Boyacá y aquellos ubicados en las sabanas de Córdoba fueron liberándose de la amenaza al tener mínimo tres años consecutivos sin reporte de deforestación (Figura 1).

Trayectorias de lotes deforestados¹⁸

El análisis de trayectorias de áreas deforestadas buscó brindar una aproximación general de los procesos que han tenido los lotes deforestados a través del tiempo y las coberturas de la tierra en las que se han convertido. Si bien fue un ejercicio exploratorio con resultados sujetos a limitaciones relacionadas con diferencias metodológicas y temporales en la captura de la información analizada¹⁹, este permitió complementar el análisis de amenaza y esbozar algunas conclusiones sobre el comportamiento geográfico y multiescalar de las áreas deforestadas a lo largo del tiempo.

En general, a escala nacional las áreas deforestadas fueron convertidas principalmente en pastos, seguido de áreas agrícolas heterogéneas, con un 29% y 25% en promedio, respectivamente. No obstante, estos cambios no fueron inmediatos, sino que se fueron dando de forma transitoria en periodos de hasta 10 o 20 años. Así mismo, la transformación a otro tipo de coberturas cambió según el periodo de tiempo y la localización de los lotes. Por ejemplo, mientras que la transformación a pastos de los lotes deforestados entre 1990 y 2000 se concentró en las llanuras de la región Caribe (departamentos de Córdoba, Sucre, Bolívar y Magdalena) para el año 2002, en 2018 esta se localizaba principalmente en la región de los Llanos del Yarí, entre los departamentos de Meta y Caquetá.

18 Debido a la dificultad de obtener unas variables medibles de forma recurrente para la definición de un índice de amenaza no autorreferido, se realizó un análisis de las trayectorias de los lotes deforestados, utilizando información de cobertura de uso del suelo, localización de cultivos ilícitos y áreas de explotación minera. De esta manera, se quiso probar la incidencia directa de actividades económicas del sector primario en los procesos de deforestación. Para ello se utilizaron capas georreferenciadas y técnicas de análisis espacial (superposición).

19 Las metodologías espaciales y temporales por las cuales se genera la información cruzada espacialmente para el análisis de trayectorias de lotes deforestados son muy distintas, aún si se trata de la misma fuente, generando una limitación en la comparabilidad de los datos. Por ejemplo, si bien la información espacial sobre deforestación y coberturas de la tierra es producida por el IDEAM mediante el uso y tratamiento de imágenes satelitales y sensores remotos, las metodologías de captura y producción, así como la escala y los periodos de análisis son distintos, lo que puede generar algunos tipos de brechas. Esto explica el por qué, al identificar la trazabilidad de un área deforestada, los periodos siguientes puedan marcar que esta siga siendo bosque.

Ahora bien, al realizar este análisis a escalas más detalladas, la relevancia del tipo de cobertura en la que se convirtieron las áreas deforestadas varía. Por ejemplo, para el periodo 2011-2018, mientras que los pastos representaron entre el 40% y 60% de la deforestación en los departamentos de Arauca, Caquetá, Meta, Guaviare y Santander; en Risaralda, Nariño, Norte de Santander, Córdoba y Magdalena la cobertura predominante de las áreas deforestadas fueron las áreas agrícolas heterogéneas, con valores entre el 40% y 50%.

Por otra parte, con el fin de tener una aproximación de la relación entre deforestación y cultivos de coca, se realizó el cruce espacial de los lotes deforestados con los lotes de cultivos de coca interpretados por el SIMCI²⁰. Los resultados indicaron que la participación de los cultivos de coca en la deforestación nacional fue de máximo 2,4% para un solo año (2019), y de 6,8% acumulado para el periodo comprendido entre 2015 y 2020. Así mismo, el dato nacional es de 4,4% de la deforestación acumulada entre 2013 y 2021 (53.278 ha de coca sobre 1.310.372 ha deforestadas).

Al realizar el mismo ejercicio en escala departamental, en Norte de Santander se evidenció la mayor relación entre coca y deforestación, con un 27% acumulado entre 2013 y 2020 (17.410 ha de coca sobre 64.324 ha deforestadas durante el periodo), fenómeno que se concentró en los municipios de la región del Catatumbo. Para este mismo periodo, le siguieron Nariño con 22% (concentrados en los municipios de la región pacífica), Putumayo con 8%, Antioquia con 3% (particularmente sobre la región del Bajo Cauca) y Guaviare con 2%. A su vez, en la escala municipal la relación deforestación-cultivos de coca aumentó sustancialmente en casos específicos como el de Tumaco, donde el 42% del área total deforestada en el municipio en 2013 (616 ha) se transformó en coca entre ese año y el 2021, o el de Tibú, donde fue transformada en este cultivo el 48% de la deforestación de 2015 entre ese año y el 2021.

En cuanto a la relación entre la deforestación y la explotación de oro de aluvión (EVOA), el análisis espacial indicó que esta actividad representó el 1% de los bosques perdidos en el país entre 2014 y 2020 (13.328 ha de EVOA sobre 1.189.574 ha deforestadas), con una mayor representatividad a escala departamental (11% de la deforestación en el Chocó, y 4% en los departamentos de Bolívar y Cauca) y municipal (83% de las 464 ha deforestadas en Unión Panamericana en 2014 y 82% de las 401 ha deforestadas en río Quito en 2016).

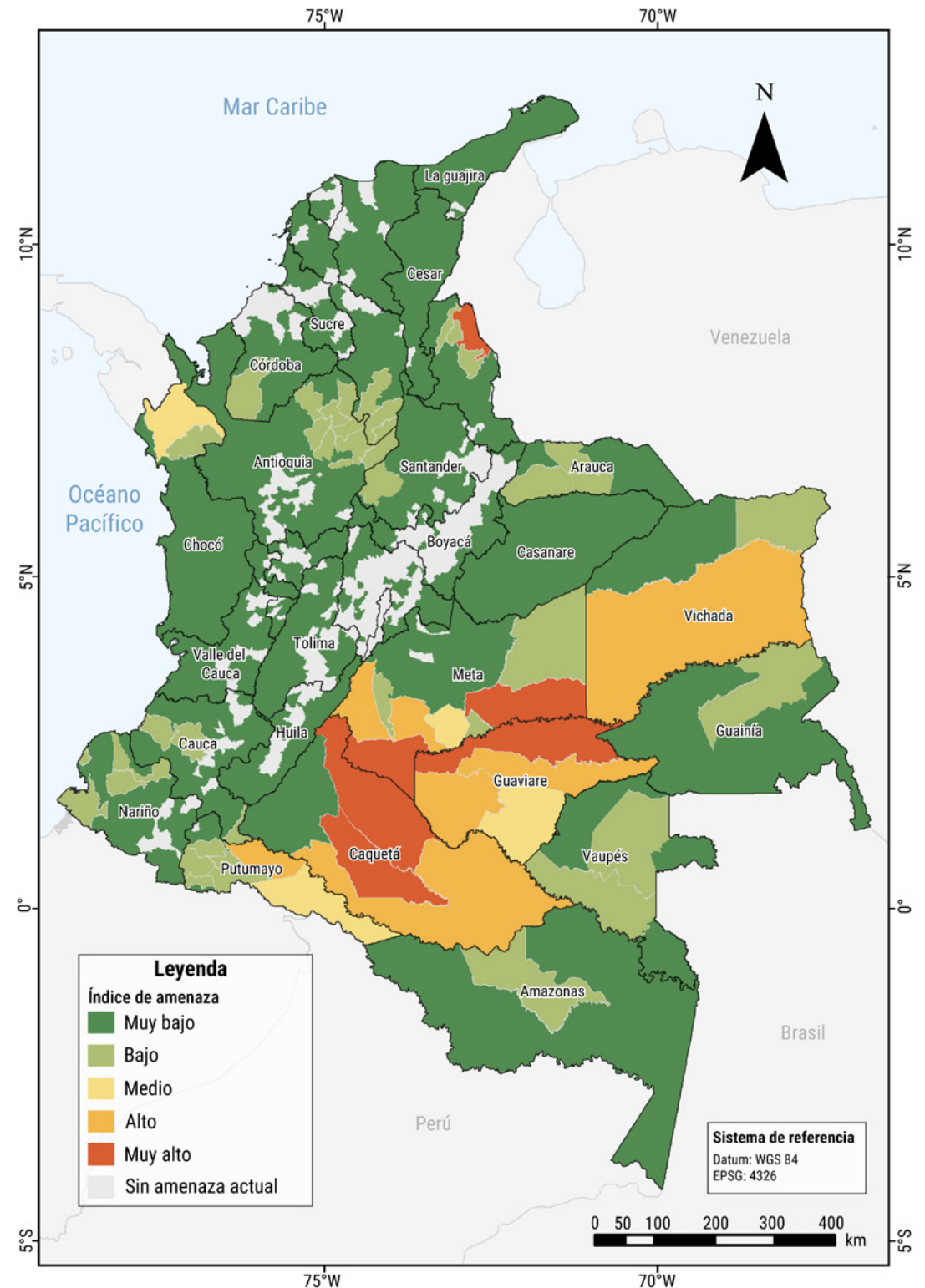
Finalmente, al hacer la relación de áreas deforestadas con zonas de explotación minera legalmente titulada, se pudo evidenciar que para el periodo 2013-2020 dicha actividad correspondió al 0,8% de la deforestación a nivel nacional. De estas, el 65% correspondió a la explotación de oro, plata y otros materiales asociados, el 21% a materiales de construcción, 9% a cobre y asociados, 3% a carbón y 2% otros materiales.

Vulnerabilidad municipal a la deforestación

La vulnerabilidad abarca los factores propios del territorio que influyen en que este sea más o menos susceptible de ser afectado por la deforestación, ya sea por cuestiones sociales, económicas, políticas, culturales, entre otras. Como parte del análisis de riesgo, y reconociendo los elementos aportados por los actores institucionales a cargo de la gestión sobre el fenómeno, la vulnerabilidad

20 Sistema de Monitoreo Integral de Cultivos Ilícitos de la Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC).

Figura 1 - Mapa del índice de amenaza municipal de deforestación, 2021



a la deforestación fue evaluada desde veintinueve variables (47 subvariables) clasificadas en cinco categorías: social, económica, institucional, seguridad y territorial²¹ (ver Anexo 1).

En este sentido, para cada categoría se calculó un subíndice que posteriormente se promedió para obtener el índice de vulnerabilidad municipal a la deforestación. La valoración del índice presentó una escala normalizada de 0 a 1, donde los valores cercanos a uno indicaron mayor nivel de vulnerabilidad y los aproximados a cero, menor nivel (Tabla 5).

Tabla 5 - Rangos de valoración del índice de vulnerabilidad de deforestación

Vulnerabilidad	Índice (rango)
Muy baja	0,00 - 0,04
Baja	0,04 - 0,13
Media	0,13 - 0,32
Alta	0,32 - 0,58
Muy alta	0,58 - 1,00

Para 2021, 147 municipios (incluyendo áreas no municipalizadas²²) presentaron un nivel muy alto de vulnerabilidad territorial a la deforestación y se localizaron principalmente en las regiones Amazónica, Pacífica, parte de la Orinoquía y algunos municipios hacia el Bajo Cauca antioqueño, sur de Bolívar y Catatumbo en Norte de Santander. En cuanto al nivel alto de vulnerabilidad, se presentó en 482 municipios localizados en la periferia de los de muy alta vulnerabilidad. La vulnerabilidad media tendió a concentrarse en la región Andina, especialmente en el centro del país: Boyacá, Cundinamarca, sur de Santander, sur de Norte de Santander y municipios cordilleranos de Nariño. En cuanto a los valores bajos, se presentaron en 46 municipios de Boyacá y Cundinamarca, principalmente. Por su parte, solo Busbanzá en Boyacá obtuvo una vulnerabilidad muy baja (Figura 2).

Los municipios con mayor vulnerabilidad para 2021, en orden de importancia fueron: Tumaco en Nariño, Puerto Asís en Putumayo, Cartagena del Chairá en Caquetá, El Retorno en Guaviare, y San Vicente del Caguán en Caquetá; para estos municipios el subíndice más crítico fue el que evaluó la categoría de seguridad (Tabla 6).

Tabla 6 - Top quince de municipios con mayor índice de vulnerabilidad a la deforestación, 2021

Posición 2021	Departamento	Municipio	Índice de vulnerabilidad 2021	Rango vulnerabilidad 2021	Rangos Categoría territorial	Rangos Categoría económica	Rangos Categoría social	Rangos Categoría seguridad	Rangos Categoría institucional
1	Nariño	Tumaco	1,00	Muy alto	Bajo	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Alto
2	Putumayo	Puerto Asís	0,92	Muy alto	Medio	Alto	Muy alto	Muy alto	Alto

21 La categoría social está conformada por variables de analfabetismo y desplazamiento; la categoría económica, por variables de Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI), actividades económicas y porcentaje de las Unidades de Producción Agropecuaria por tamaño; la categoría institucional, por variables de Medición Desempeño Municipal, presencia y cantidad de sedes de Parques Nacionales Naturales, presencia y cantidad de sedes de Fiscalía, presencia de sedes CAR e índice de complejidad municipal para actualización catastral; la categoría de seguridad, por variables de municipios priorizados por el conflicto armado y riesgo de violencia electoral; y la categoría territorial, por variables de delimitación de territorios colectivos (resguardos indígenas, tierras de las comunidades negras y resguardos indígenas), distancia a centros poblados, distancia a vías y distancia a coberturas de la tierra (pastos, mosaicos, y cultivos)

22 Debido a la falta de información de las variables de vulnerabilidad para las áreas no municipalizadas presentes en los departamentos de Amazonas, Guainía y Vaupés, para cada categoría se realizó el promedio del valor departamental y se asignó a cada área no municipalizada.

Posición 2021	Departamento	Municipio	Índice de vulnerabilidad 2021	Rango vulnerabilidad 2021	Rangos Categoría territorial	Rangos Categoría económica	Rangos Categoría social	Rangos Categoría seguridad	Rangos Categoría institucional
3	Caquetá	Cartagena del Chairá	0,92	Muy alto	Medio	Alto	Muy alto	Muy alto	Medio
4	Guaviare	El Retorno	0,90	Muy alto	Alto	Medio	Alto	Muy alto	Alto
5	Caquetá	San Vicente del Caguán	0,90	Muy alto	Medio	Alto	Muy alto	Muy alto	Medio
6	Bolívar	San Pablo	0,88	Muy alto	Bajo	Alto	Muy alto	Muy alto	Alto
7	Arauca	Araucita	0,88	Muy alto	Muy bajo	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Alto
8	Antioquia	Cáceres	0,87	Muy alto	Muy bajo	Alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto
9	Córdoba	Puerto Libertador	0,87	Muy alto	Muy bajo	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Medio
10	Córdoba	Tierralta	0,87	Muy alto	Bajo	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Bajo
11	Guaviare	Miraflores	0,86	Muy alto	Medio	Alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto
12	Córdoba	Montelíbano	0,86	Muy alto	Muy bajo	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Alto
13	Choco	Riosucio	0,86	Muy alto	Medio	Muy alto	Muy alto	Alto	Bajo
14	Antioquia	Yondó	0,85	Muy alto	Muy alto	Alto	Muy alto	Medio	Alto
15	Nariño	Barbacoas	0,85	Muy alto	Bajo	Muy alto	Muy alto	Alto	Alto

Al revisar el comportamiento de la vulnerabilidad durante los últimos cinco años llamó la atención el incremento que se presentó de forma general en el país, pero principalmente en municipios de las regiones Pacífica, Amazónica, Bajo Cauca, Urabá y la Alta Guajira.

Riesgo de deforestación por municipio

Una vez obtenidos los índices de amenaza y vulnerabilidad, se calculó el índice de riesgo mediante su producto matemático. La valoración del índice se presentó en una escala normalizada de 0 a 1, donde los valores cercanos a uno indicaron un mayor nivel de riesgo y los próximos a cero, un menor nivel (Tabla 7).

Tabla 7 - Rangos de valoración del índice de riesgo de deforestación

Riesgo	Índice (rango)
Muy bajo	0,00 - 0,04
Bajo	0,04 - 0,13
Medio	0,13 - 0,32
Alto	0,32 - 0,58
Muy alto	0,58 - 1,00

Para 2021, cinco municipios alcanzaron un riesgo *muy alto* de deforestación; estos se encontraban localizados, principalmente, en el área de transición entre las regiones Orinoquía y Amazonia y son en su orden: Cartagena del Chairá en Caquetá, Mapiripán en Meta, San Vicente del Caguán en Caquetá y San José en el Guaviare. Así mismo, y de forma aislada, el municipio de Tibú en la región de Catatumbo en Norte de Santander.

Por su parte, tres municipios alcanzaron un riesgo *alto*, La Macarena en Meta, El Retorno y Calamar en Guaviare, localizados de forma contigua a los municipios con mayor riesgo y a aquellos categorizados con riesgo *medio*, tales como Cumaribo en Vichada, La Uribe, Vista Hermosa y Puerto Rico en la Meta, Miraflores en Guaviare, Solano en Caquetá, y Puerto Leguizamo y Puerto Guzmán en Putumayo. A estos se sumó Riosucio en el departamento de Chocó, para un total de nueve municipios con este nivel de riesgo (Figura 3). En Tibú se registró la expansión del riesgo hacia el sur, en el municipio de Sardinata; lo mismo ocurrió en Riosucio donde el riesgo se expandió hacia el municipio de Carmen del Darién.

Figura 2 - Mapa del índice de vulnerabilidad municipal por deforestación, 2021

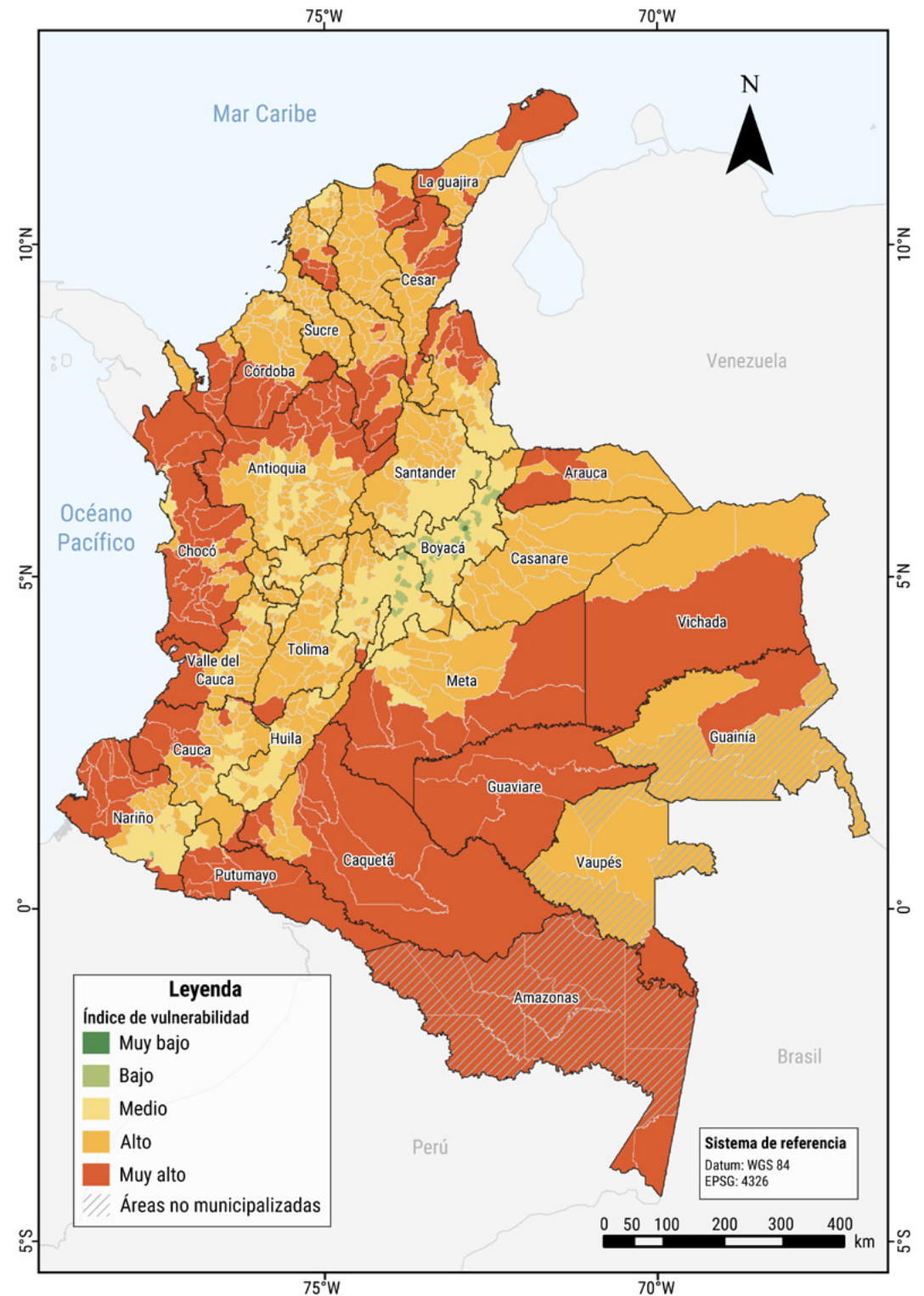
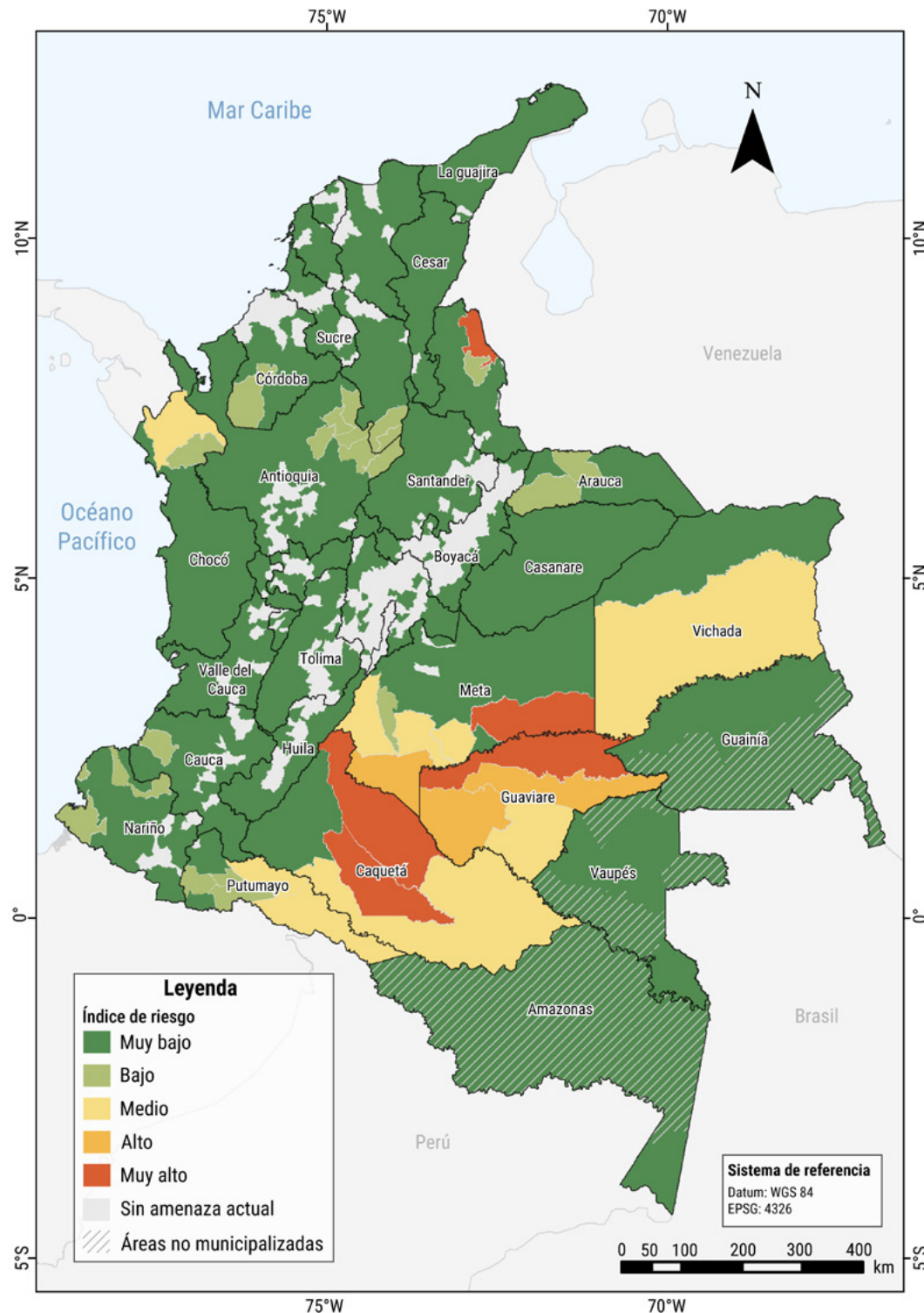


Figura 3 - Mapa del índice de riesgo municipal por deforestación, 2021



El comportamiento geográfico del riesgo de deforestación permitió identificar un corredor entre Cumaribo (Vichada) y Puerto Leguízamo (Putumayo) que mantuvo una condición de riesgo *medio-alto* durante los últimos años y constituyó la zona de máxima afectación por deforestación. Adicionalmente, se observaron algunas áreas de riesgo *bajo* en los departamentos de Arauca, Nariño y Córdoba, así como la región del bajo Cauca y el Magdalena Medio en los departamentos de Antioquia y Bolívar. El resto del país se encontró en riesgo *muy bajo* o *sin riesgo*, situación dada en los municipios sin valores de amenaza por deforestación²³.

Ahora bien, teniendo en cuenta el comportamiento del riesgo en los últimos cinco años (Tabla 8), se observó que la concentración se mantuvo en los mismos municipios, con calificaciones cambiantes entre riesgos *medio*, *alto* y *muy alto*, pero con un evidente aumento significativo en Tibú, que año a año fue escalando entre los quince municipios con mayor índice de riesgo del país. Así mismo, en los últimos cinco años, el riesgo se mantuvo en la categoría de *muy alto* en San José de Guaviare, Cartagena del Chairá y San Vicente del Caguán. Adicionalmente algunos territorios en riesgo *bajo* presentaron dinámicas de expansión, particularmente en las regiones del Bajo Cauca antioqueño y el Magdalena Medio, así como los departamentos de Nariño y Arauca.

Tabla 8 - Top quince de municipios con mayor índice de riesgo de deforestación, 2021

Departamento	Municipio	Índice de riesgo 2021	Rango riesgo 2021	Rango amenaza 2021	Rango vulnerabilidad 2021	Posición 2017	Posición 2018	Posición 2019	Posición 2020	Posición 2021
Caquetá	Cartagena del Chairá	1,00	Muy alto	Muy alto	Muy alto	2	2	1	2	1
Meta	Maipiripán	0,86	Muy alto	Muy alto	Muy alto	11	10	7	3	2
Caquetá	San Vicente del Caguán	0,82	Muy alto	Muy alto	Muy alto	1	1	2	4	3
Norte de Santander	Tibú	0,63	Muy alto	Muy alto	Muy alto	14	13	11	7	4
Guaviare	San José del Guaviare	0,61	Muy alto	Muy alto	Muy alto	3	4	4	5	5
Meta	La Macarena	0,52	Alto	Muy alto	Muy alto	4	3	3	1	6
Guaviare	El Retorno	0,40	Alto	Alto	Muy alto	6	6	6	6	7
Guaviare	Calamar	0,34	Alto	Alto	Muy alto	5	5	5	8	8
Caquetá	Solano	0,31	Medio	Alto	Muy alto	7	8	9	11	9
Meta	Vista Hermosa	0,28	Medio	Alto	Muy alto	16	16	12	14	10
Putumayo	Puerto Guzmán	0,28	Medio	Alto	Muy alto	9	7	10	9	11
Chocó	Riosucio	0,27	Medio	Medio	Muy alto	10	12	14	12	12
Vichada	Cumaribo	0,26	Medio	Alto	Muy alto	13	11	8	10	13
Meta	La Uribe	0,24	Medio	Alto	Muy alto	8	9	16	13	14
Putumayo	Puerto Leguízamo	0,22	Medio	Medio	Muy alto	12	15	15	16	15

Discusión

Los resultados de esta propuesta metodológica presentan convergencias y divergencias con estudios realizados por otros autores. Para efectos prácticos, la discusión se centrará a la luz de las investigaciones realizadas por el Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono (SMBYC) del IDEAM quienes producen las cifras oficiales de deforestación en el país y con quienes se socializaron los resultados de esta investigación.

23 Un municipio se considera sin amenaza a completar mínimo tres años consecutivos sin reporte de deforestación.

Con base en los resultados presentados previamente, los municipios categorizados con amenaza *muy alta* coinciden con los núcleos de alta deforestación registrados por el SMBYC en su informe 2021 (IDEAM y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [Minambiente], 2022). Sin embargo, el índice de amenaza permitió identificar un corredor con valores medios a muy altos que se extiende desde el municipio de Cumaribo (Vichada) en zona de frontera con Venezuela hasta el municipio de Puerto Leguízamo (Putumayo) en frontera con Perú y Ecuador. Aunque en el informe de Actualización de cifras de monitoreo de la superficie de bosque 2021 no es visible este corredor, su identificación puede deberse a un tema de diferencias en la escala de los análisis. Asimismo, los resultados municipales de la amenaza permitieron identificar zonas de amenaza *baja* sobre las que debería prestarse atención temprana, ubicadas en la región pacífica de los departamentos de Nariño y Cauca, en Arauca, sur de Córdoba y la región del Magdalena Medio y Bajo Cauca en los departamentos de Antioquia, Bolívar y Santander. Es así como este análisis permitió localizar territorios en donde la deforestación aún no es crítica, pero se deben tener en cuenta de manera diferencial en la lucha contra la deforestación.

Pese a que no fue posible realizar el cálculo de un índice de amenaza consistente que incluyera los motores de deforestación (malas prácticas extensivas de ganadería, agricultura, cultivos ilícitos, minería, etc.) dada la fragilidad e inconsistencia de la información, el análisis de trayectorias realizado permitió una aproximación general para conocer los procesos que han tenido los lotes deforestados a través del tiempo y las coberturas de la tierra en las que se han convertido. De esta manera, se pudo afirmar que no existe una única actividad económica que fomenta la deforestación, y menos de forma generalizada en la escala nacional. Si bien algunos autores describen los motores de deforestación, mencionando entre ellos la ganadería, la minería o los cultivos ilícitos (González Arenas et al., 2018b), la representatividad de cada una de estas actividades varía significativamente según la escala de análisis o el municipio específico en que ocurre el fenómeno. Asimismo, las transiciones de un tipo de cobertura a otra no son inmediatas, sino que son el resultado de diversos fenómenos y procesos que predominan sobre el territorio durante un tiempo específico.

Por tal motivo, fue posible afirmar que para comprender los causales de la deforestación se requiere un análisis espacial y multitemporal del comportamiento en la cobertura del suelo, que describa cómo se fue dando la pérdida de bosque y las coberturas que lo fueron reemplazando a lo largo del tiempo.

El análisis de trayectorias de áreas deforestadas permitió concluir que la coca no explica las dinámicas de deforestación a nivel nacional, puesto que solo ha representado el 4% del fenómeno en los últimos diez años, cifra cercana a la expuesta por la Oficina de las Naciones contra la Droga y el Delito en su estudio de caracterización y análisis de la dinámica de la deforestación y degradación del bosque por causa de los cultivos de coca en el Catatumbo y la Amazonía (UNODC, 2018). No obstante, a escala municipal, en lugares como Tumaco y Santa Bárbara (Nariño), El Tambo (Cauca), Tibú y El Tarra (Norte de Santander), la coca sí pareciera ser el principal motor de deforestación, dado que la relación entre ambos fenómenos puede alcanzar hasta el 42% para el área deforestada en un solo año. Lo mismo ocurrió

para el caso de la EVOA en algunos municipios del Chocó como Unión Panamericana, río Quito, Medio Atrato y El Cantón de San Pablo, donde la misma relación alcanzó hasta un 83%. Estos hallazgos coincidieron con las principales causas y agentes de la deforestación para los núcleos de alta deforestación Catatumbo, Pacífico Norte y Pacífico Sur descritos por el IDEAM en su reporte de monitoreo de la superficie de bosque de 2021 (IDEAM y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022).

Respecto a la praderización de áreas que fueron bosque, los casos se concentraron en municipios y departamentos de fuerte actividad ganadera. Por ejemplo, en el caso específico de Caquetá, la conversión a pastos representó el 7,4% de la deforestación total del país en el periodo 1990-2000 y el 11,6% en el periodo 2011-2018. En el caso de Arauca, el 65% de las 30.857 ha que se deforestaron entre 2011 y 2018 se convirtieron en pastos.

Todo lo anterior indica que las acciones de prevención y mitigación de la deforestación deberán estar sectorizadas, escaladas y diferenciadas de acuerdo con el ámbito territorial en el que esta ocurre, respondiendo específicamente a dinámicas particulares del territorio, ya sean económicas, sociales o de seguridad. Esto representa un reto para la institucionalidad ambiental del país, y requiere una revisión de los enfoques que se han adelantado para combatir el fenómeno (Minambiente et al., 2017).

En cuanto al análisis de los resultados del índice de vulnerabilidad, la suposición subyacente es que la vulnerabilidad es un fenómeno multifacético que no puede ser capturado adecuadamente por una sola categoría. En este sentido, la metodología propuesta aportó en la integración de información de variables del orden social, económico, institucional, seguridad y territorial que ayudaran a entender las causas subyacentes a la deforestación (González Arenas et al., 2018b). En la revisión de estudios complementarios, no se encontraron hallazgos de datos a escala nacional que relacionaran variables de vulnerabilidad con deforestación.

Por lo anterior, es importante mencionar que los resultados permitieron evidenciar que dentro de la vulnerabilidad el factor impulsor más potente a nivel nacional fue la vulnerabilidad institucional, seguido por la vulnerabilidad social y la económica. La vulnerabilidad asociada a la seguridad tuvo un factor de menor impulso, excepto en algunos de los departamentos que registraron la mayor afectación (Guaviare, Putumayo, Caquetá y Cauca). En el caso del departamento del Amazonas, el principal factor de impulso se dio en la categoría territorial, que incluyó variables relacionadas como la presencia de territorios colectivos (resguardos indígenas, tierras de las comunidades negras y resguardos indígenas), distancia a centros poblados, distancia a vías y distancia a coberturas de la tierra (pastos, mosaicos, y cultivos).

De esta manera, al combinar los índices de amenaza y vulnerabilidad en un único índice de riesgo de deforestación, las zonas de riesgo *alto* y *muy alto* se encontraron concentradas en la región de transición Orinoquía-Amazonía, específicamente en los departamentos de Meta, Guaviare y Caquetá. De esta región, los municipios con la más *alta* condición de riesgo fueron San José del Guaviare, Mapiripán, Cartagena del Chairá y San Vicente del Caguán, seguidos por La Macarena, El Retorno y Calamar. Los resultados coinciden en alta proporción con los núcleos de deforestación identificados para ese año por el IDEAM y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2022).

Por otra parte, se evidenció que es necesario prestar mayor atención sobre las áreas no municipalizadas al ser las áreas de mayor debilidad institucional, en las que el contexto puede favorecer la dispersión de acciones ilícitas que fomenten la deforestación. Adicionalmente, son aquellas áreas con gran disponibilidad de bosque a eliminar para la adecuación de tierras a otras actividades. En este sentido, si no hay un cambio en la trayectoria del comportamiento de la deforestación, dichas áreas incrementarán su riesgo, y se perderán espacios estratégicos para la conservación y prestación de servicios ecosistémicos en el país.

Finalmente, a manera de recomendación para fortalecer el índice de riesgo, se propone incluir la variable de área de bosque relativa en el municipio con el fin de contar con un mapa alterno de riesgo de deforestación que permita focalizar acciones en los municipios que, aunque tienen poco bosque es inminente protegerlos.

Conclusiones

De la investigación realizada para la construcción de un índice de riesgo de deforestación a escala municipal para todo el país, se concluye que fue posible integrar indicadores de amenaza y vulnerabilidad para generar un índice compuesto que permitió tener una visión simultánea de los municipios en los que la intensidad de la deforestación se combina con debilidades/fragilidades del territorio, ya sea en el ámbito social, económico, institucional o de seguridad.

El cálculo del índice de deforestación solo fue posible realizarlo a escala municipal, toda vez que es la única unidad territorial que cuenta con información recurrente y confiable que permitiera calcular la amenaza y la vulnerabilidad como componentes del riesgo. Análisis más detallados bajo este mismo enfoque solo podrán realizarse para determinados territorios sobre los que se pueda acceder a información. No obstante, estos territorios no coinciden necesariamente con aquellos más afectados por la deforestación en Colombia.

Aunque el fenómeno de deforestación no obedece a fronteras político-administrativas, se considera pertinente la unidad municipal para el diseño del índice, en tanto constituye la mínima unidad de planificación territorial y asignación presupuestal y, por tanto, es aquella sobre la que se genera información institucional de carácter oficial que permita el cálculo de los componentes de amenaza y vulnerabilidad.

Hasta el momento, no es posible realizar el cálculo de un índice de amenaza consistente que incluya los motores de deforestación como malas prácticas extensivas de ganadería, agricultura, cultivos ilícitos, etc., dada la fragilidad e inconsistencia de la información en lo concerniente a algunas de las variables relacionadas con la amenaza. Sin embargo, el desarrollo de análisis de trayectorias puede ser una alternativa de aproximación a la incidencia de actividades antrópicas en la deforestación, toda vez que describe a escalas detalladas el comportamiento multitemporal de las áreas cubiertas por bosque que fueron reemplazadas por otra actividad. De esta manera, podrán sacarse conclusiones más detalladas sobre la relación de determinados fenómenos con la deforestación.

Se considera pertinente la evaluación de la vulnerabilidad a partir de un índice compuesto, ya que permite integrar distintas dimensiones que condicionan el nivel de resistencia y la capacidad de afrontamiento de la deforestación a escala municipal. Por lo

general, los estudios consultados se basaron en el análisis de variables de amenaza como lo son los motores de deforestación. Sin embargo, el enfoque propuesto propone evaluar la vulnerabilidad a través de categorías que integren variables de orden social, económico, institucional y de seguridad que por lo general no son evaluados en los estudios de deforestación.

Referencias

- Carmona Sánchez, C., Supelano González, D. y Osejo Villamil, I. (2015). *Tipologías departamentales y municipales: una propuesta para comprender las entidades territoriales colombiana*. Departamento Nacional de Planeación. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Estudios%20Economicos/2015may28%20Tipologias.pdf>
- Crespo Garay, C. (24 de junio de 2020). *La deforestación de Amazonas alcanza niveles históricos debido al consumo de carne*. Medio Ambiente, National Geographic. <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2020/06/deforestacion-amazonas-alcanza-niveles-historicos-debido-consumo-carne>
- González Arenas, J. J., Cubillos Buitrago, A., Chadid Hernández, M. A., Cubillos González, A., Arias Patiño, M., Zúñiga Avirama, E., Joubert, F., Pérez Vizcaíno, I. R. y Berrío Meneses, V. (2018a). *Caracterización de las principales causas y agentes de la deforestación a nivel nacional período 2005-2015*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Minambiente), y Programa ONU-REDD. <https://www.undp.org/es/colombia/publicaciones/caracterizacion-de-las-principales-causas-y-agentes-de-la-deforestacion-nivel-nacional-periodo-2005-2015>
- González Arenas, J. J., Cubillos Buitrago, A., Chadid Hernández, M. A., Arias Patiño, M., Zúñiga Avirama, E., Joubert, F., Cubillos González, M. A. y Pérez Vizcaíno, I. R. (2018b). *Lineamientos conceptuales y metodológicos para la caracterización de causas y agentes de la deforestación en Colombia*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Pre), y Programa ONU-REDD. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/95680a3d-1dac-46ac-b067-ee3bd4540608/content>
- González Arenas, J. J., Pérez Vizcaíno, I. R., Cubillos González, A., Zúñiga Avirama, E., Cubillos Buitrago, A., Arias Patiño, M. y Chadid Hernández, M. A. (2018c). *Escenarios de deforestación para la toma de decisiones: propuesta metodológica y ámbito de aplicación*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)- Programa ONU-REDD.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2022). *Actualización de cifras de monitoreo de la superficie de bosque – Año 2021*. <https://www.wandi.com.co/Uploads/583212846-Sistema-de-Monitoreo-de-Bosques-y-Carbono.pdf>
- Jenks, G. F. (1967). The Data Model Concept in Statistical Mapping. *International Yearbook Cartography*, (7), 186-190.
- Lombana González, E. V. (2020). *Vulnerabilidad municipal al establecimiento de cultivos de coca en Colombia: Una aproximación desde la nueva geografía económica* [Tesis de maestría, Universidad Externado de Colombia]. Repositorio Institucional – Universidad del Externado.
- Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Programa de colaboración de las Naciones Unidas para la Reducción de Emisiones de la Deforestación y la Degradación de los bosques en los países en desarrollo, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Cooperación Alemana GIZ, Forest Carbon, Banco Mundial y Fondo Acción. (2017). *Bosques. Territorios de vida. Estrategia Integral de Control a la Deforestación y Gestión de los Bosques*. https://redd.unfcccint/medias/eicdgb_bosques_territorios_de_vida_webpdf
- Restrepo, I. F. y González, J. (2007). De Pearson a Spearman. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 20(2), 183-192.
- scikit-learn. (s.f.) [Documentación de un lenguaje de programación]. MinMaxScaler. scikit-learn, Machine Learning in Python. <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.preprocessing.MinMaxScaler.html>
- Turner, B. L. II, Kasperson, R. E., Matson, P. A., McCarthy, J. J., Corell, R. W., Christensen, L., Eckley, N., Kasperson, J. X., Luers, A., Martello, M. L., Polsky, C., Pulsipher, A. y Schiller, A. (2003). A Framework for Vulnerability Analysis in Sustainability Science. *Biological Sciences*, 100(14), 8074-8079. <https://doi.org/10.1073/pnas.1231335100>
- Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito. (2018). *Comunidad, bosque y coca: un camino para la acción*. Editorial Scripto.
- World Wildlife Fund. (12 de febrero de 2024). *Los devastadores impactos de la deforestación en Colombia*. World Wildlife Fund. <https://www.wwf.org/co/?386550/deforestacion-colombia-causas-consecuencias>

Anexo 1 - Variables incluidas en el ejercicio de construcción del índice de riesgo

Variables de vulnerabilidad				
No	Dimensión	Variable	Subvariable	Peso
1	Social	Analfabetismo	No informa lee y escribe	0,30
2		Analfabetismo	No lee y escribe	0,16
3		Desplazamiento - ocurrencia	Desplazamiento - ocurrencia	0,14
4		Desplazamiento - eventos	Desplazamiento - eventos	0,14
5		Analfabetismo	Si lee y escribe	0,14
6		Desplazamiento - llegada	Desplazamiento - llegada	0,12
7	Económica	Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI)	NBI total	0,09
8		Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI)	NBI cabecera	0,09
9		Actividades económicas - Porcentaje del valor agregado por sector	Actividades sector secundario	0,09
10		Actividades económicas - Porcentaje del valor agregado por sector	Actividades sector terciario	0,08
11		Porcentaje de las Unidades de Producción Agropecuaria (UPA) por tamaño	Porcentaje UPA de 3 a 5 ha	0,08
12		Porcentaje de las Unidades de Producción Agropecuaria por tamaño	Porcentaje UPA de 5 a 10 ha	0,07
13		Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI)	NBI resto	0,06
14		Porcentaje de las Unidades de Producción Agropecuaria por tamaño	Porcentaje UPA de 1 a 3 ha	0,06
15		Porcentaje de las Unidades de Producción Agropecuaria por tamaño	Porcentaje UPA de 0 a 1 ha	0,05
16		Porcentaje de las Unidades de Producción Agropecuaria por tamaño	Porcentaje UPA de 50 a 100 ha	0,05
17		Porcentaje de las Unidades de Producción Agropecuaria por tamaño	Porcentaje UPA de 10 a 15 ha	0,05
18		Actividades económicas - Porcentaje del valor agregado por sector	Actividades sector primario	0,05
19		Porcentaje de las Unidades de Producción Agropecuaria por tamaño	Porcentaje UPA de 20 a 50 ha	0,05
20		Porcentaje de las Unidades de Producción Agropecuaria por tamaño	Porcentaje UPA de 15 a 20 ha	0,04
21	Porcentaje de las Unidades de Producción Agropecuaria por tamaño	Porcentaje UPA mayor de 100 ha	0,04	
22	Institucional	Índice de Desempeño Fiscal (IDF)	IDF	0,04
23		Medición Desempeño Municipal (MDM)	MDM resultados	0,16
24		Medición Desempeño Municipal (MDM)	MDM gestión	0,12
25		Medición Desempeño Municipal (MDM)	MDM puntaje	0,12
26		Número de sedes de PNN	Número de sedes de PNN	0,12
27		Presencia de sedes PNN	Presencia de sedes PNN	0,12
28		Presencia de sedes fiscalía (relacionadas con investigaciones en deforestación)	Presencia de sedes fiscalía	0,11
29		Número de sedes de fiscalía (relacionadas con investigaciones en deforestación)	Número de sedes de fiscalía	0,11
30		Índice de complejidad municipal para actualización catastral (ICMAC)	ICMAC	0,08
31		Presencia sedes CAR	Presencia sedes CAR	0,06
32	Seguridad	Municipios priorizados por el conflicto armado	Municipios PNIS	0,43
33		Riesgo de violencia electoral	Riesgo de violencia electoral	0,39
34		Municipios priorizados por el conflicto armado	Municipios PDET	0,39
35	Territorial	Delimitación de zonas de reserva campesina	Presencia media de zonas de reserva campesina en el municipio	0,25
36		Delimitación de tierras de las comunidades negras	Presencia media de tierras de comunidades negras en el municipio	0,12
37		Distancia a centros poblados	Distancia media al centro poblado más cercano	0,09
38		Distancia a vías	Distancia media a la vía tipo más cercana	0,09
39		Distancia a mosaicos	Distancia media a mosaicos	0,08
40		Distancia a cultivos transitorios	Distancia media a cultivos transitorios	0,07
41		Distancia a cultivos permanentes	Distancia media a cultivos permanentes	0,06
42		Densidad vial por kilómetro cuadrado	Densidad media vial en el municipio	0,05
43		Límites de reservas de Ley 2 de 1959	Presencia media de zonas de ley 2 en el municipio	0,05
44		Distancia a vías	Distancia media a la vía tipo 5-6 más cercana	0,05
45		Distancia a pastos	Distancia media a pastos	0,03
46		Distancia a vías	Distancia media a la vía tipo 1-4 más cercana	0,03
47		Delimitación de resguardos indígenas	Presencia media de resguardos indígenas en el municipio	0,02



Variables de amenaza		
No	Dimensión	Variable
1	Deforestación	Concentración de la deforestación
2	Deforestación	Tendencia de la deforestación

Grupos de uso y manejo de los suelos del Centro Agropecuario Marengo CAM^{*}

Soil Use and Management Groups of The Marengo Agricultural and Livestock Center CAM

Napoleón Ordoñez Delgado¹ 

Resumen

El área de estudio corresponde al Centro Agropecuario Marengo (CAM), de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, ubicado en el municipio de Mosquera-Cundinamarca, que cubre 94,55 hectáreas. Partiendo del estudio de *Levantamiento Agrológico del Centro Agropecuario Marengo (CAM)* de Ordoñez y Bolívar (2014), se analizaron las propiedades físicas y químicas de las diferentes Unidades Cartográficas de Suelos, representadas por 15 perfiles modales, con el fin de establecer grupos de manejo, teniendo en cuenta los problemas de drenaje, compactación, salinización, sodicidad y niveles freáticos fluctuantes. El área de estudio carece de un sistema adecuado de drenaje que permita la rápida y eficiente evacuación del exceso de agua lluvia, dando origen a encharcamientos, aunado al deterioro de la capa superficial del suelo causado por el pisoteo del ganado vacuno, caprino y ovino, además del paso de maquinaria agrícola. Se definieron cuatro grupos de manejo, que permiten evaluar y caracterizar adecuadamente, el drenaje, la compactación y la influencia de las sales incluyendo el sodio, que limitan el desarrollo y la productividad. Se recomendaron cultivos tolerantes a las condiciones de cada uno de los grupos de manejo, al igual que un sistema de riego que se ajusta a las características de estos suelos.

Cómo citar

Ordoñez Delgado, N. (2024). Grupos de uso y manejo de los suelos del Centro Agropecuario Marengo CAM. *Análisis Geográficos*, 57 (1), 70 - 82.

Palabras clave:

compactación del suelo, degradación de suelos, mapa edafológico, nivel de agua, salinidad, tierra agrícola.

Abstract

The study area corresponds to the Marengo Agricultural Center (CAM), of the National University of Colombia, Bogotá, located in the municipality of Mosquera-Cundinamarca, which covers 94,55 hectares. Based on the Agrológico Survey study of the Marengo Agricultural Center (CAM), Ordoñez and Bolívar (2014), the physical and chemical properties of the different Soil Cartographic Units, represented by 15 modal profiles, were analyzed in order to establish management groups, taking into account the problems of drainage, compaction, salinization, sodicity and fluctuating water table levels. The study area lacks an adequate drainage system that allows for the rapid and efficient evacuation of excess rainwater, causing waterlogging, in addition to the deterioration of the topsoil caused by the trampling of cattle, goats and sheep, as well as the passage of agricultural machinery. Four management groups were defined to evaluate and adequately characterize drainage, compaction and the influence of salts, including sodium, which limit development and productivity. Crops tolerant to the conditions of each of the management groups were recommended, as well as an irrigation system that adjusts to the characteristics of these soils.

Keyword:

soil compaction, soil degradation, edaphological map, water level, salinity, agricultural land.

Introducción

El uso, manejo y conservación del recurso suelo se ha convertido en un problema importante, ya que los efectos socioeconómicos y ecológicos de la agricultura convencional, que considera el suelo fuente de nutrientes para el desarrollo de las plantas, no ha tenido en cuenta su vulnerabilidad a fenómenos como la contaminación, compactación, salinización y alcalinización, que traen como consecuencia la erosión y degradación, así como la pérdida total de este recurso no renovable a corto plazo. La degradación del suelo es un proceso donde se altera su capacidad para poder dar cumplimiento a sus funciones, es decir su calidad (Pla Sentís, 2010). La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura —FAO— (2016), define la degradación de los suelos como un “cambio en la salud del suelo” puesto que este proceso conduce a la pérdida de la capacidad productiva de los mismos.

Dentro de las funciones que el suelo proporciona se encuentran: sostener la productividad de plantas y animales, mantener o mejorar la calidad del aire y del agua, sostener la salud humana, la actividad biológica, la biodiversidad y la productividad, filtrar, amortiguar, degradar e inmovilizar contaminantes, almacenar y reciclar nutrientes y soportar estructuras socioeconómicas asociadas con el hábitat humano (Etchevers et al., 2009).

El levantamiento de suelos es la rama de la pedología que tiene el propósito de estudiar, clasificar y cartografiar los suelos para predecir su comportamiento bajo diferentes usos y manejos, pero este proceso puede ser lento y costoso. Sin embargo, al darle un enfoque geopedológico a dicha herramienta, se contempla una alternativa para el mejoramiento de suelos, particularmente a partir del levantamiento geomorfológico, que facilita la localización de sitios de muestro y permite explicar la variabilidad espacial de los suelos. La pedología proporciona el contenido edáfico de las unidades de mapeo en términos de componentes taxonómicos, porcentaje de área y patrón de distribución espacial (Zinck, 2014).

La cartografía de suelos es el mayor objetivo de la ciencia del suelo, ya que proporciona información útil para predecir la distribución espacial de propiedades edáficas, para la toma de decisiones en la planificación del uso de suelo, proyectos de desarrollo agrícola, evaluación de erosión, manejo y conservación de recursos natu-

rales (Zinck, 2014).

En síntesis, el objetivo más importante de los levantamientos agrológicos, después de conocer los suelos de una región determinada y el patrón de distribución en la dimensión espacial, es la definición de su capacidad de uso y las prácticas de manejo, de tal manera que el desarrollo agrícola, ganadero y forestal, así como las acciones encaminadas a la conservación, preservación y/o restauración del medio natural, se ejecuten de acuerdo a la vocación de las tierras y a los requerimientos de protección cuando son vulnerables ante la acción de los factores ambientales y la actividad del hombre (Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], 2010).

Este estudio señala los sitios que poseen problemas en el CAM relacionados con compactación de suelos, salinidad, y drenaje. Los resultados permiten crear grupos de manejo donde se agrupan los suelos con limitaciones similares, permitiendo así tomar decisiones para corregir sus deficiencias por un lado o para seleccionar especies agrícolas que toleren las limitaciones identificadas por el otro.

El objetivo principal de este estudio fue analizar las características de las unidades cartográficas de suelos representadas en quince perfiles modales y relacionarlas con el manejo de los suelos del Centro Agropecuario Marengo, con el propósito de implementar mejores prácticas de uso y manejo.

El suelo es un recurso dinámico y vivo, clave tanto para la producción de alimentos y fibras, como para el balance global y la función de los ecosistemas. La calidad y la salud de los suelos determina la sostenibilidad agrícola y la calidad medioambiental y, como una consecuencia de ambas, la salud de las plantas, animales y humanos (Doran et al., 1997).

Para que este concepto sea práctico, es preciso contar con datos que permitan evaluar la condición del suelo. Por lo que surgen los indicadores, que son variables que representan una condición y muestran información sobre los cambios o tendencias (Dumanski et al., 1998). Los indicadores de calidad del suelo se crean como una herramienta de medición que ofrece información sobre las propiedades, procesos y características, los mismos que se miden para dar seguimiento a los efectos del manejo y sobre el funcionamiento del suelo en un determinado periodo (Astier-Calderón et al., 2002). La calidad del suelo es considerada como una medida de su capacidad para funcionar adecuadamente en relación con

* Agradezco a los estudiantes, profesores e investigadores de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia-sede Bogotá.

Dedicado a Paola y a mis nietos.

¹ Instituto Geográfico Agustín Codazzi – Colombia. nordonez@igac.govco. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7750-5621>.

un uso específico (Gregorich et al., 1994). Conocer la calidad de los suelos es de suma importancia, ya que contribuyen a establecer la sostenibilidad de las diferentes actividades que se llevan a cabo en este (Moreno et al., 2015). Los suelos con máxima calidad son capaces de mantener alta productividad y causar el mínimo deterioro ambiental (Ferrerías et al., 2009).

Hoy, el 23% de la superficie terrestre presenta algún nivel de degradación de los suelos, con tasas estimadas de 5 a 10 millones de hectáreas, que afectan a unos 1500 millones de personas en el mundo y que conlleva la pérdida de la fertilidad y calidad del suelo, ya que la degradación del suelo se define como el declive temporal o permanente de su capacidad de producción.

También puede definirse la degradación del suelo como la pérdida de la fertilidad actual o potencial, pérdida de cualidades intrínsecas y de funciones del suelo (Zavala-Cruz et al., 2011). Cuando los procesos de degradación ocurren sin la intervención del hombre, generalmente se producen a una velocidad que está en equilibrio con la velocidad de recuperación natural. Sin embargo, la degradación acelerada del suelo se produce comúnmente como resultado de la intervención humana en el ambiente (Stocking y Murnaghan, 2003; Porta Casanellas y López-Acevedo Reguerin, 2005).

Los estudios de levantamientos de suelos tienen una finalidad práctica y es el de hacer predicciones, más numerosas, más precisas y útiles para propósitos específicos, como el de mapear el uso y manejo de los suelos, incluyendo las condiciones que limitan su uso y generan riesgo de degradación. Es decir, definir la capacidad potencial que tienen los suelos para ser utilizadas bajo cierto tipo general de uso con prácticas específicas de manejo y poder agrupar y mapear suelos que presentan limitaciones como la salinidad, la sodicidad, la compactación y los niveles freáticos profundos o fluctuantes, que generan graves problemas.

La degradación ocasionada por el deterioro interno causa problemas físicos al suelo, como la destrucción de la estructura debido a agentes naturales, inducidos por el manejo (sobrepastoreo) y que está relacionada con la textura. Este proceso se puede analizar desde dos puntos de vista: El primero, consiste en la formación de costras endurecidas a determinadas profundidades del perfil y en caso extremo el afloramiento de los horizontes subsuperficiales. Este encostramiento es el resultado de la degradación de la cubierta vegetal y de la erosión hídrica, que deja al descubierto estos horizontes. El segundo se refiere a los cambios adversos en las propiedades físicas del suelo como son la porosidad, permeabilidad, densidad aparente y estabilidad estructural (Ortiz et al., 1994).

El encostramiento y la compactación se refieren al sellamiento o relleno de los poros del suelo con material fino, que resulta del paso continuo de la maquinaria, vehículos y/o ganado en el terreno, o por el efecto de las gotas de lluvia, estos efectos desarrollan una capa impermeable en la superficie del suelo que impide la infiltración del agua de lluvia (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT] y Colegio de Posgraduados [CP] 2002). Otro aspecto para tener en cuenta es el contenido bajo de materia orgánica de los suelos, que implica que los espacios de aire se reduzcan drásticamente, entonces el suelo adquiere la apariencia de bloques compactos. (Ortiz et al., 1994). La compactación es reversible y su ocurrencia es previsible, o al

menos controlable. Es un problema mundial que abarca todos los suelos y niveles de producción agrícola, es el tipo más difícil de degradación de suelos para localizar y racionalizar, debido a que es un fenómeno que ocurre sobre todo debajo de la superficie. No hay evidencia superficial clara que evidencie su existencia a diferencia de la salinización y la erosión (FAO, 2016).

La degradación química es otra causa importante que debe tenerse en cuenta y puede presentarse por: concentraciones de sustancias tóxicas, pérdida de bases intercambiables, por actividad antrópica, contaminación de las corrientes de agua con hidrocarburos o metales pesados etc., que hacen que la productividad disminuya drásticamente, hasta el punto de quedar en nada cuando las concentraciones de sustancias tóxicas sobrepasan los umbrales (Ortiz et al., 1994).

Los factores que inciden en la salinización y sodización de los suelos son de origen natural y de origen antrópico. El primero es afectado por el clima, la meteorización de los minerales y rocas de la superficie de la corteza terrestre (material parental), el tipo de ocupación del suelo y la topografía. El segundo, puede dar origen a la salinización y sodización de varias maneras: riego con aguas con alto contenido de sales, ascenso de las capas freáticas por filtración de canales y depósitos sin revestir, distribución desigual del agua de riego, malos métodos de regadío, drenaje inadecuado, usos de fertilizantes y otros insumos especialmente en zonas de agricultura intensiva en las que la tierra es poco impermeable y las posibilidades de lixiviación son limitadas, utilización de aguas residuales salinas e inadecuadas para el riego, vertido al suelo de aguas residuales salinas, contaminación de suelos por aguas o subproductos industriales salinos.

Frecuentemente, la salinización y la sodización son características de las zonas de regadío con escasa pluviometría, elevados índices de evapotranspiración, o una textura del suelo que impide el lavado de sales y debido a ello se acumulan en las capas superficiales. El riego con aguas con alto contenido en sales agrava el problema.

La utilización del agua subterránea para riego complementario puede producir salinización y sodificación de suelos, por lo tanto, a los riesgos de contaminación de los acuíferos debido a una mala gestión del recurso, se le suma la salinización y sodización del recurso suelo, que se puede presentar por el uso de agua de baja calidad para el riego. (Peinemann et al., 1998).

Es muy importante tener en cuenta el ascenso del nivel freático, ya que bajo ciertas condiciones climáticas la evaporación directa del agua origina concentraciones altas de sales, produciendo la alcalinización del suelo. Por otro lado, dicho ascenso capilar puede favorecer el aporte hídrico a la zona radicular, si se encuentra a poca profundidad o favorecer la aireación si es más profundo (Pepi et al., 1998).

Los estudios de fluctuaciones de los niveles freáticos subterráneos son de mucha importancia, porque el movimiento de los mantos freáticos es la principal causa de los problemas de salinidad y drenaje. (SEMANART y CP, 2002).

En síntesis, problemas como la erosión, salinización y compactación son procesos de la degradación del suelo (Malagón, 2016) que pueden ser mitigados mediante el monitoreo (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2014), y la implementación de prácticas y tecnologías basadas en el conocimiento de las características físicas, químicas, biológicas y mineralógicas de cada suelo.

Las sales que se encuentran en los suelos salinos proceden de la meteorización de los minerales y rocas de la superficie de la corteza terrestre. Estas sales son arrastradas por el agua y se van depositando en los suelos y depresiones haciendo que se produzcan mantos freáticos salinos. Todas las aguas de riego poseen sales solubles en mayor o menor medida, provocando la salinización de los suelos y provocando dificultades en el desarrollo de los cultivos. La calidad del agua de riego y su influencia sobre las características del suelo es otro de los parámetros para tener en cuenta en los procesos de degradación del suelo.

Metodología

Descripción del área de estudio

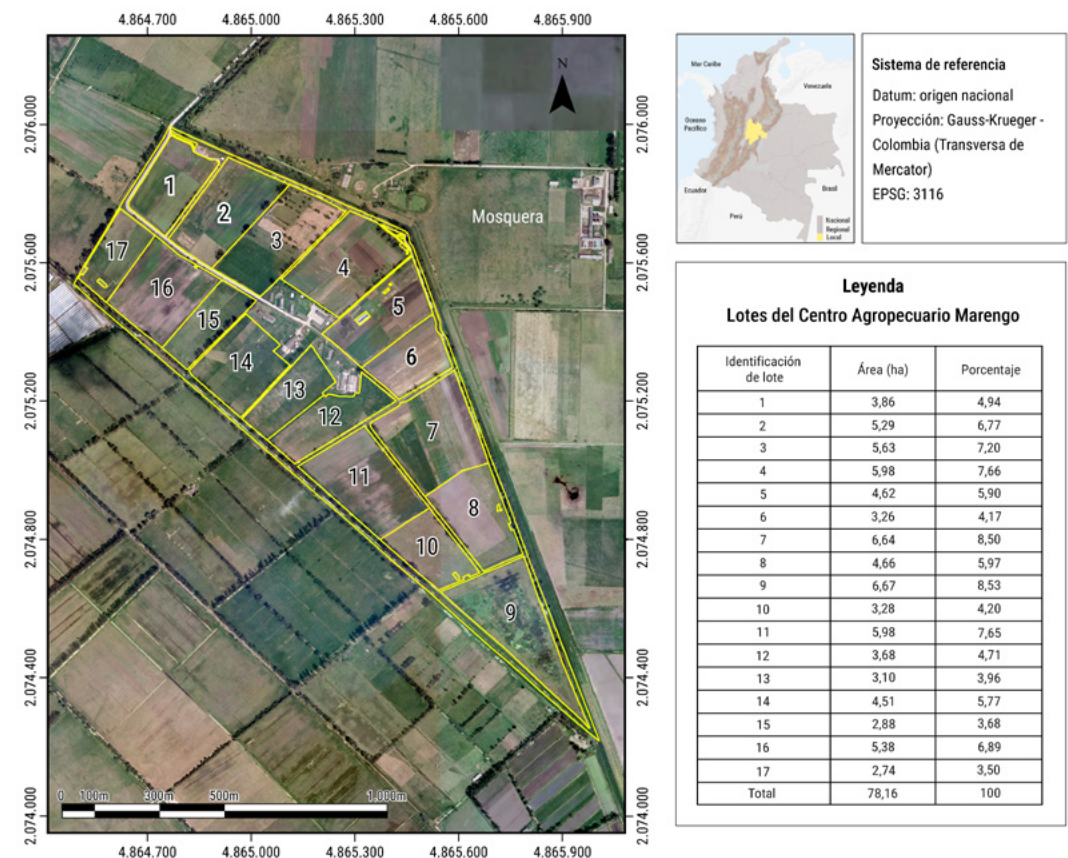
El área de estudio corresponde al Centro Agropecuario Marengo (CAM) ubicado en el municipio de Mosquera (Cundinamarca), subdividido en 17 lotes con una extensión total de 94,55 hectáreas de las cuales 15,04 ha (15,9%), corresponden a construcciones, vías y pantanos (Figura 1). El uso de los suelos ha sido mayoritaria-

mente en actividad ganadera y caprina con algunas rotaciones de cultivos transitorios como maíz y avena.

En cuanto a las características climáticas del área, esta presenta una distribución de lluvias bimodal con una precipitación media anual de 1.124,3 mm. La temperatura media es de 12,7 °C con una variación máxima de temperatura entre el día y la noche de 13 °C en los meses de diciembre y enero, que junto a condiciones de baja humedad relativa favorece la presencia de heladas. El clima del área según la clasificación de Caldas – Lang es Frío Seco (Ordóñez y Bolívar, 2014).

Estos suelos del CAM han sido originados a partir de arcillas fluviolacustres, sedimentos aluviales y ceniza volcánica. La clasificación taxonómica corresponde a tres órdenes de suelos, Inceptisoles, Molisoles y Andisoles, con una participación de 59%, 28% y 13% del área neta del centro, respectivamente. Los Inceptisoles y Andisoles presentan características de buen drenaje ubicados básicamente en los planos de terraza; por otro lado, los molisoles presentan drenaje pobre a muy pobre y se encuentran generalmente ubicados en las cubetas de decantación (Ordóñez y Bolívar, 2014).

Figura 1 - Ubicación del Centro Agropecuario Marengo y distribución de lotes



Conformación de grupos de manejo

Para la conformación de grupos de manejo se toma como base el levantamiento agrológico del CAM, se analizaron cada una de las Unidades Cartográficas de Suelos, definiendo las limitaciones que se encontraron, tomando en cuenta el perfil modal, tanto la descripción de esta, como los datos analíticos de las muestras de suelos tomadas en cada horizonte del perfil modal, así las cosas se agruparon las UCS cuyo perfil modal y descripción tuvieran limitaciones similares en cuanto a salinidad, problemas de drenaje y compactación, así como las UCS cuyos suelos no tienen limitantes severas para su uso y manejo.

Resultados

Propiedades físicas

Para el análisis del uso y manejo de los suelos se tomaron muestras de los tres primeros horizontes de los perfiles modales de las 15 unidades cartográficas de suelos que existen en el CAM, estas muestras fueron analizadas tanto desde el punto de vista físico como químico en el Laboratorio Nacional de Suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, desde el punto de vista físico se analizaron las siguientes determinaciones: porcentaje de limo, porcentaje de arcilla, densidad aparente, clase textural, porosidad total y estabilidad estructural. Los resultados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1 - Formato de captura de información de movimientos en masa y erosión

UCS	Perfil	Horizontes		%L	%A	Da ^a g/cm ³	Clase textural	PT ^{**} %	Estabilidad estructural DPM ^{***}
		cm	Limo						
Consociación Maizal	M-3	0-37	38.81	51.54	1.11	Ar	52.16	Estable	Ligeramente estable
		17-43	44.56	44.18	1.23	ArL	47.21	Ligeramente estable	
		43-70	55.95	27.02	1.05	FArL	56.07	Ligeramente estable	
Consociación Invernadero	M-4	0-14	56.14	34.00	1.0	FArL	57.63	Moderadamente estable	Moderadamente estable
		14-34	57.45	31.00	0.87	FArL	62.50	Moderadamente estable	
		34-55	58.0	30.00	0.78	FArL	63.72	Moderadamente estable	
Consociación Abejas	M-15	0-13	36.61	57.37	1.01	Ar	55.70	Estable	Estable
		13-47	33.67	60.02	1.48	Ar	38.84	Estable	
		47-93	51.90	32.55	0.06	FArL	60.66	Estable	
Consociación Riego	M-10	0-14	41.99	48.24	1.02	ArL	54.87	Moderadamente estable	Estable
		14-46	49.92	39.09	1.27	FArL	43.56	Ligeramente estable	
		46-72	56.81	38.43	1.23	FArL	47.44	Ligeramente estable	
Consociación Acacia	M-14	0-14	55.14	34.28	0.75	FArL	66.37	Moderadamente estable	Moderadamente estable
		14-37	57.65	31.67	0.94	FArL	57.66	Moderadamente estable	
		37-58	58.97	30.02	1.00	FArL	55.16	Moderadamente estable	
Consociación Ganado	M-13	0-37	40.89	49.49	0.95	ArL	57.78	Estable	Moderadamente estable
		37-74	50.95	36.57	1.07	FArL	54.47	Estable	
		74-90	54.07	29.38	0.97	FArL	56.31	Ligeramente estable	
Consociación Ciencia	M-8	0-14	56.89	38.60	0.94	FArL	58.59	Ligeramente estable	Ligeramente estable
		14-29	52.94	35.68	1.17	FArL	48.68	Ligeramente estable	
		29-60	49.86	34.20	1.15	FArL	52.67	Ligeramente estable	
Consociación Rábano	M-7	0-25	42.95	47.93	1.08	ArL	53.04	Estable	Estable
		25-41	43.20	47.71	1.27	ArL	45.26	Estable	
		41-71	57.45	25.14	0.97	FL	58.55	Ligeramente estable	
Consociación Ovejas	M-6	0-36	36.89	55.69	1.32	Ar	43.10	Estable	Moderadamente estable
		36-52	43.34	45.63	1.28	ArL	45.53	Moderadamente estable	
		52-70	58.81	28.57	0.97	FArL	59.41	Ligeramente estable	
Consociación Feijoa	M-5	0-45	56.88	33.15	0.98	FArL	56.44	Moderadamente estable	Moderadamente estable
		45-77	67.85	19.80	0.88	FL	62.87	Inestable	
		77-106	71.39	6.84	0.71	FL	69.40	Inestable	
Consociación Eucalipto	M-1	0-25	44.65	31.46	0.97	FAr	56.11	Estable	Ligeramente estable
		25-40	68.67	8.50	0.79	FL	66.24	Ligeramente estable	
		40-67	74.81	8.52	0.70	FL	71.19	Inestable	

UCS	Perfil	Horizontes cm	%L	%A	Da ^a g/cm ³	Clase textural	PT ^{**} %	Estabilidad estructural DPM ^{***}
Consociación Eucalipto II	M-11	0-30	56.27	39.48	0.82	FArL	62.73	Estable
		30-48	53.61	32.05	0.81	FArL	64.63	Ligeramente estable
		48-77	69.70	11.61	0.66	FL	71.43	Inestable
Consociación Humedal	M-2	0-42	36.70	55.49	1.14	Ar	48.88	Estable
		42-63	43.90	46.60	1.20	ArL	47.83	Ligeramente estable
		63-96	62.03	26.73	1.01	FL	57.92	Ligeramente estable
Consociación Cíclo	M-9	0-15	50.01	40.68	1.08	ArL	52.21	Ligeramente estable
		15-44	57.70	33.95	1.24	FArL	45.61	Ligeramente estable
		44-80	49.21	38.02	0.94	FArL	60.67	Inestable
Consociación Avena	M-12	0-19	46.93	41.72	1.36	ArL	41.63	Estable
		19-47	57.81	23.59	0.91	FL	62.24	Inestable
		47-70	50.80	21.20	0.76	FL	67.38	Ligeramente estable

Nota: ^aDa = densidad aparente; ^{**}PT = porosidad total; ^{***}DPM = diámetro ponderado medio.

La evaluación de estos parámetros permite obtener información del avance de los procesos de degradación del suelo, sus causas y el efecto de estos, sobre las propiedades físicas y químicas, que pueden incidir el manejo adecuado de estos suelos.

Propiedades químicas

Para el análisis del uso y manejo de los suelos se tomaron en cuenta los mismos primeros horizontes y las siguientes características químicas: porcentaje de carbono orgánico, pH, conductividad eléctrica, porcentaje de sodio intercambiable, clase salina y fertilidad, teniendo en cuenta el valor y la calificación. Los resultados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2 - Características químicas de las Unidades Cartográficas de Suelos utilizadas para la evaluación

UCS	Perfil	Horizonte cm	CO ^a %	pH ±1	CE ^b (ds/m)	PSI ^c %	Clase	Fertilidad Calificación	
								Valor	Calificación
Consociación Maizal	M-3	0-37	2.7	5.1	1.30	3.20	N	70	Alta
		17-43	1.0	5.7	0.78	4.80	N		
		43-70	1.0	5.0	1.40	14.80	N		
Consociación Invernadero	M-4	0-14	3.1	5.0	1.8	1.2	N	71	Alta
		14-34	3.2	5.2	1.0	2.8	N		
		34-55	3.0	5.0	1.5	15.0	N		
Consociación Abejas	M-15	0-13	3.8	5.3	2.0	1.2	N	73	Alta
		13-47	2.6	5.4	1.6	16.3	Na		
		47-93	1.3	5.5	2.6	19.9	Na		
Consociación Riego	M-10	0-14	3.8	5.7	1.0	2.8	N	75	Alta
		14-46	1.6	5.9	3.36	19.5	Na		
		46-72	1.5	6.6	0.9	5.9	N		
Consociación Acacia	M-14	0-14	5.7	5.7	10.7	14.7	S2	79	Alta
		14-37	5.8	5.7	9.9	22.0	S2Na		
		37-58	5.3	5.8	8.9	29.7	S2Na		
Consociación Ganado	M-13	0-37	5.3	5.9	2.2	8.5	L	86	Muy alta
		37-74	1.5	5.3	1.8	19.0	N		
		74-90	0.9	5.6	2.9	13.3	L		
Consociación Ciencia	M-8	0-14	2.8	5.3	0.9	4.7	N	73	Alta
		14-29	2.0	5.4	0.9	3.6	N		
		29-60	0.6	5.7	1.1	16.8	Na		
Consociación Rábano	M-7	0-25	3.1	5.4	2.0	5.8	L	82	Alta
		25-41	1.5	5.4	1.4	6.4	N		
		41-71	1.2	5.5	1.9	6.5	N		
Consociación Ovejas	M-6	0-36	2.4	5.7	0.34	5.1	N	8,8	Muy alta
		36-52	1.8	5.2	0.51	5.7	N		
		52-70	1.1	5.6	0.68	10.6	N		
Consociación Feijoa	M-5	0-45	3.0	5.6	0.34	7.8	N	8,8	Muy alta
		45-77	0.9	5.7	0.51	21.7	Na		
		77-106	1.3	5.7	0.68	16.2	Na		
Consociación Eucalipto	M-1	0-25	1.5	5.6	2.38	11.7	L	73	Alta
		25-40	7.0	6.5	0.54	9.8	N		
		40-67	1.2	6.5	1.91	15.8	Na		
Consociación Eucalipto II	M-11	0-30	5.3	5.3	4.8	10.9	Si	8,6	Muy alta
		30-48	3.3	5.4	4.0	13.4	Si		
		48-77	2.9	5.4	6.1	19.9	SiNa		
Consociación Humedal	M-2	0-42	2.6	5.0	1.72	4.91	N	7,8	Alta
		42-63	1.4	5.2	1.17	4.91	N		
		63-96	0.91	5.5	1.36	12.28	N		
Consociación Cíclo	M-9	0-15	3.0	5.4	5.0	8.5	Si	7,7	Alta
		15-44	1.3	5.4	3.9	11.9	L		
		44-80	1.3	5.4	4.0	15.5	Na		
Consociación Avena	M-12	0-19	3.1	5.4	1.8	5.9	N	8,2	Alta
		19-47	1.2	5.6	1.9	13.3	N		
		47-70	1.2	5.6	2.5	15.0	Na		

Nota: ^aCO = carbono orgánico; ^bCE = conductividad eléctrica; ^cPSI = porcentaje de sodio intercambiable.

Discusión de resultados

Discusión de las propiedades físicas de los suelos

Los resultados analíticos de las propiedades físicas de las diferentes unidades cartográficas de suelos, tenidos en cuenta para implementar un manejo adecuado, permiten analizar diferentes comportamientos de los suelos así:

Análisis granulométrico: el análisis indica que la fracción de tierra fina menor de 2 mm, en la que se centran los estudios de uso y manejo está constituida por partículas de diferente tamaño, predominando las arcillas y los limos en los tres primeros horizontes especialmente. Estas fracciones indican que se trata de suelos pesados, que en general son plásticos en mojado y muy duros en estado seco, lo que hace que tengan grandes dificultades para el laboreo, por lo que es importante trabajarlos con el estado adecuado de humedad. Estos suelos retardan el movimiento del agua y el aire dentro del perfil y presentan riesgo de formación de sellado y de costra superficial. En las Unidades Cartográficas de Suelos, en donde disminuye el porcentaje de arcilla, aumenta el porcentaje de limo, lo cual es propio del material geológico que dio origen a estos suelos, correspondientes a materiales formados por la sedimentación del antiguo lago que cubrió la parte central de la sabana de Bogotá, que al secarse (año 38.000 a.C.) permitió que el río Bogotá y sus afluentes empezaran la disección del relleno lacustre, lo que explica las variada posiciones que ocupan los distintos materiales, tales como, arcillas lacustres, terrazas aluviales, depósitos coluviales y cenizas volcánicas. Las arcillas lacustres identificadas en el CAM, son una consecuencia de la colmatación sucedida en un gran lago donde procesos tectónicos alternaban en periodos pluviales fríos con periodos cálidos de relativa sequía, dando origen a sedimentos de arenas finas, limos y turbas con intercalaciones arcillosas. Respecto a los materiales derivados de cenizas volcánicas identificados en el CAM provienen de la actividad de los volcanes del complejo Ruiz, Santa Isabel y Tolima, constituyendo total o parcialmente el perfil.

Densidad aparente: el análisis de esta característica indica que hay dos comportamientos diferentes en los perfiles de suelos analizados. El primero varía entre 1,0 g/cm³ y 1,48 g/cm³ y el otro entre 0,70 g/cm³ y 0,98 g/cm³ en general. Además, muestran incremento en el segundo horizonte y tendencia a disminuir en el tercer horizonte. Estos resultados indican que como se trata de un parámetro relacionado con las prácticas de manejo de los suelos y aguas y por consiguiente, la que más influye sobre la productividad de los cultivos, su comportamiento está asociado con la difusión de nutrientes en el suelo, y al aumentar, se incrementa la compactación y se afectan las condiciones de retención de humedad, limitando a su vez el crecimiento de las raíces. La naturaleza, las dimensiones y el arreglo de las partículas del suelo (Brady y Weil, 1999), además de factores relacionados con su génesis y formación que también influyen sobre los valores de la densidad aparente, por lo cual es necesario el análisis de otras propiedades, que permitan estar seguros de este comportamiento, que es lo que se hace seguidamente. Los horizontes que presentan rangos de densidad por debajo de 1,0 g/cc, son suelos con presencia cenizas volcánicas, que tienen que ver con el material parental que los originó y corresponden a los perfiles M-5, M-1, M-11 y M-12.

La porosidad total de un suelo varía del 40% a 60%. Valores inferiores pueden causar asfixia en las raíces, al igual que bajos contenidos de retención de agua y/o ambos a la vez. Un valor superior al límite máximo supone una dificultada para el contacto entre el suelo y las raíces de las plantas. En este rango superior se encuentran los perfiles M-1, horizontes segundo y tercero, M-5, horizontes segundo y tercero, M-11, los tres primeros horizontes, M-14, primer horizonte, M-12, segundo y tercer horizonte, este último perteneciente a la geoforma cubeta de desborde, con un comportamiento especial, ya que considerando los datos de macroporosidad y microporosidad, que se estimaron en el levantamiento agrológico del CAM, para la misma capa, presentan un comportamiento inverso (disminución), condición que refleja la existencia de un horizonte con disminución en el movimiento del agua y desarrollo de raíces desde los primeros centímetros (Ordoñez y Bolívar, 2014). Cuando en los suelos predomina la microporosidad se genera un ambiente asfíxico y reductor con escaso suministro de oxígeno para las raíces, como se manifiesta en los perfiles: M-14, segundo y tercer horizonte, M-15, los tres primeros horizontes, M-6, segundo y tercer horizontes, M-7, tercer horizonte, M-8, segundo horizonte, M-13, tercer horizonte. La contraria supone una buena aireación, pero una retención de agua insuficiente, perfil M-1, los tres primeros horizontes, y perfil M-2, segundo horizonte.

La estabilidad de la estructura es definida como la resistencia que los agregados del suelo ofrecen a los agentes disgregantes externos, como el agua, el viento, el pisoteo, y manipulaciones mecánicas. Estos suelos en su mayoría son estables en el primer horizonte, lo que indica que la materia orgánica juega un papel importante en la estabilidad de los primeros horizontes. Sin embargo, la tendencia es a disminuir esa estabilidad hacia la profundidad del perfil, tornándose de estables a ligeramente estables hasta inestables, lo que indica que el agente disgregante de estos suelos es el agua, que a medida que permanece más tiempo en contacto con los agregados, estos tienden a colapsarse, ya que las sustancias cementantes tienden a disolverse o debilitarse.

En los perfiles M-1 y M-11 a medida que profundizan pasan de estables, a moderadamente estables e inestables como se aprecia en el tercer horizonte, en donde hace presencia el catión sodio, causante de la degradación de estos suelos, ya que actúa como agente dispersante de algunos coloides del suelo. El perfil M-5 se torna inestable desde el segundo horizonte hacia la profundidad y esto se debe a que el sodio comienza a estar presente a medida que se profundiza en el perfil, provocando la dispersión de los coloides y la degradación del suelo.

Profundidad Efectiva: la profundidad efectiva de los suelos es muy importante tenerla en cuenta porque de ella depende el volumen de agua que el suelo puede almacenar para el crecimiento óptimo de las plantas. La raíz de la planta profundidad hasta donde las condiciones de aireación y drenaje le permitan respirar y, además, en estos suelos esta es afectada también por las fluctuaciones del nivel freático.

Los niveles freáticos de los perfiles de suelos M-3, M-8, M-4 y M-10, pertenecientes a la posición geomorfológica planicie de desborde y los perfiles modales M-2 y M-9 de la posición geomorfológica cubeta de desborde, varían en profundidad, entre 30 cm, 50 cm y 80 cm de la superficie, lo que favorece el ascenso

de sales y sodio a través del perfil, e impide el lavado de estas, cuando se han aplicado como fertilizantes minerales al suelo.

Estas condiciones se presentan por ser suelos de planicie de desborde del Río Bogotá, cuyas aguas, están altamente contaminadas, problema agravado además por la baja porosidad y la compactación que retienen el flujo del agua y dificultan su percolación. Son suelos pobremente drenados como lo informa la descripción de campo y los análisis físicos.

El color del suelo: el cual se determinó en campo mediante la utilización de la tabla Munsell, es importante como indicador de características del suelo que pueden ser críticas para el desarrollo de estas. En estos suelos en donde el drenaje no es uniforme, los colores grises y la presencia de moteados asociados a diferentes compuestos de hierro, son indicativos del drenaje pobre. Algunos pueden tener coloraciones negras por presencia de materia orgánica o de óxidos de manganeso. La determinación de esta propiedad fue valorada en campo directamente, utilizando la tabla de colores propia para tal fin.

Discusión de las propiedades químicas de los suelos

Las propiedades químicas analizadas para el manejo de estos suelos fueron el pH, la conductividad eléctrica, el porcentaje de sodio intercambiable y la materia orgánica, que están relacionadas, de alguna manera, con las propiedades físicas del suelo, puesto que son indicativos de la degradación de los suelos, tales como la salinización y la alcalinización (véase Tabla 2).

Salinización: las sales afectan a las propiedades fisicoquímicas del suelo, produciendo un efecto importante sobre el rendimiento de los cultivos pues se produce un exceso de iones Na (sodicidad) con respecto a los iones Ca y Mg, rotura o dispersión de los agregados con lo que se bloquean los poros conductores y, además, se reduce la permeabilidad del suelo debido a que se compacta y la capacidad del suelo para que la planta pueda absorber el agua queda severamente reducida.

Los problemas de drenaje que presentan estos suelos indirectamente producen acumulaciones salinas en la superficie o bien a diferentes profundidades del perfil del suelo, que provocan efectos adversos en la permeabilidad del suelo y afectan la infiltración del agua, siendo este un caso específico de excesos de sodio.

Las sales son buenas conductoras de electricidad y por ello la manera de medir el contenido total de sales se hace mediante la determinación de la conductividad eléctrica. Por lo tanto, suelos con alto contenido de sales, como el perfil M-14, presentan los valores más altos, en tanto que los suelos medianamente salinos como el perfil M-11 y ligeramente salinos como el perfil M-7, presentan los valores más bajos respectivamente.

Alcalinización: en contraste con la salinidad, la sodicidad afecta adversamente las propiedades físicas del suelo, alterando las propiedades de los agregados y reduciendo la permeabilidad al agua y al aire. La adsorción de sodio (Na) sobre la superficie de las arcillas aumenta el espesor de la doble capa difusa que rodea a las partículas de arcilla, aumentando la fuerza repulsiva entre partículas adyacentes de igual carga. Este fenómeno produce dispersión de las arcillas y deterioro de la estructura del suelo. El efecto de la sodicidad se manifiesta generalmente en una deficiencia de calcio inducida por las altas concentraciones de sodio. La medida del pH y la relación de adsorción de sodio (RAS), que

tradicionalmente se usan para detectar problemas de sodio en el suelo, no siempre son eficaces, por tanto, es importante acudir a la medida del porcentaje de sodio intercambiable (PSI), puesto que es indispensable conocer si todo el sodio que se encuentra en el suelo es soluble y fácilmente corregible por lavado, o si hace parte del complejo intercambiable del suelo, en cuyo caso habrá otras alternativas de corrección. El PSI determinado en el análisis de salinidad, informa sobre los contenidos reales del sodio intercambiable al que se le ha descontado el sodio soluble (Taboada, 2008).

Los suelos con el PSI superior a 15, un RAS superior a 13 y una CE mayor a 4 dS/m, se clasifican como sódicos (Anexo 1) y es el caso de la mayoría de los suelos analizados, en donde la presencia del sodio está en el primer horizonte en algunos casos, o se presenta en uno de los horizontes más profundos o en otros a través de todo perfil de suelo, incrementando su valor a medida que se profundiza. Esto es debido a las fluctuaciones del nivel freático, cuyas aguas, además de ser salinas son sódicas. Solamente los perfiles M-7, M-6, M-2, M-3 y M-4 no presentan problemas de sales, ni de sodio, posiblemente porque el nivel freático se encuentra más profundo.

Carbono orgánico y pH: estas dos propiedades del suelo son indicativas de la capacidad productiva del suelo. El carbono orgánico es el principal componente de la materia orgánica del suelo y afecta tanto las propiedades químicas como las físicas del suelo, vinculadas con la productividad. Los suelos de CAM presentan rangos de pH y contenidos de CO adecuados, lo que ha permitido que tenga una muy buena fertilidad, (véase Tabla 2), considerada desde el punto de vista químico, dado que tienen la capacidad de suministrar nutrientes suficientes al cultivo, pero esta podrá ser afectada por otras características, que inciden en la penetración de las raíces para poder absorber nutrientes. Como es de esperarse los contenidos de carbón orgánico son más altos en el primer horizonte, considerada como la capa arable y disminuye a medida que se profundiza en el perfil. En cuanto al pH, este controla la movilidad de los iones, la precipitación y disolución de minerales y la disponibilidad de nutrientes. La remoción de bases (calcio, magnesio y potasio), sin reposición de estas, conlleva una disminución en el complejo de intercambio y acidificación de los suelos.

Grupos de uso y manejo

En la Tabla 3 se presentan las características y cualidades consideradas para asociar los suelos en cuatro grupos de manejo, cuya representación espacial se encuentra en la Figura 2. Adicionalmente en los anexos del 1 al 5 se encuentran las tablas soporte de la calificación de las diferentes características y cualidades evaluadas.

Para la separación de cada grupo de manejo se tuvo en cuenta el factor más limitante para el desarrollo y la productividad de los cultivos, como lo es la presencia de sales y sodio que impiden la toma de nutrientes por las plantas y afectan las propiedades fisicoquímicas del suelo. Esto debido a que como puede observarse en la Tabla 3, cada uno de los suelos presenta problemas en alguna de las condiciones evaluadas.

En la Tabla 3 también se pueden observar los horizontes de suelos con diferentes grados de compactación en condiciones naturales (sin intervención antrópica) lo que se explica por las condiciones que dominaron durante la formación y la evolución del suelo, (niveles freáticos fluctuantes), puesto que el proceso de

compactación del suelo está muy relacionado con el contenido de humedad; los suelos con un contenido de humedad igual o mayor a capacidad de campo se compactan con mayor facilidad en relación a suelos secos. Sin embargo, es bajo condiciones de intensivo uso agrícola que este fenómeno se acelera y llega a producir serios problemas en el desarrollo de las plantas cultivadas, afectando el drenaje. Independiente de la alta fertilidad de los suelos, desde el punto de vista químico, esta se ve afectada por las condiciones físicas mencionadas.

Grupo II: presenta problemas de salinidad ligera y moderada que pueden corregirse con el manejo adecuado de riego superficial y drenaje eficiente para evitar estancamientos de las sales. El agua utilizada para el riego debe estar libre de sales. Se puede utilizar para cultivos que no sean muy susceptibles a las sales o cuyas raíces no profundicen mucho, por ejemplo, algunos frutales como ciruelos, que además de tolerar sales, se adapta a suelos compactados, hortalizas como espinaca, girasol, pepino, tomate, cebada y leñosos como la higuera. Pertenecen a este grupo las UCS: Ganado (M-13; Figura 4), Maíz (M-3), Eucalipto (M-11), Ciclo (M-9).

Tabla 3 - Características y cualidades consideradas para agrupar los suelos en cuatro grupos de manejo

Grupo	Consociación	Perfil	Compactación Mpa ^a megapascales	Infiltración básica cm/hora	Drenaje natural	Profundidad del nivel freático	Fertilidad	Sales y sodio	Permeabilidad	Área ha
I	Rábano	M-7	Aceptable	Moderada	Muy pobremente drenado	No se observa	Alta	Normal	Permeable	357
	Ovejas	M-6	No aceptable	Lenta	Muy pobremente drenado	No se observa	Muy alta	Normal	Semipermeable	
	Humedal	M-2	No aceptable	Lenta	Muy pobremente drenado	Superficial	Alta	Normal	Semipermeable	
	Invernadero	M-4	Aceptable	Moderada	Moderadamente drenado	Moderadamente profundo	Alta	Normal	Semipermeable	
II	Ganado	M-13	No aceptable	Moderada	Muy pobremente drenado	No se observa	Muy alta	Ligeramente salino	Permeable	24,1
	Maíz	M-3	No aceptable	Moderada	Imperfectamente drenado	Superficial a los 55 cm	Alta	Ligeramente salino	Semipermeable	
	Eucalipto II	M-11	Aceptable	Moderada	Bien drenado	No se observa	Muy alta	Moderadamente salino	Permeable	
	Ciclo	M-9	Aceptable	Moderada	Imperfectamente drenado	Superficial a los 50 cm	Alta	Moderadamente salino	Semipermeable	
III	Acacia	M-14	No aceptable	Moderada	Bien drenado	No se observa	Alta	Salino sódico	Semipermeable	1,17
IV	Abeja	M-15	No aceptable	Moderada	Encharcamientos ocasionales	No se observa	Alta	Sódico	Semipermeable	18,4
	Feijoa	M-5	Aceptable	Rápida	Bien drenado	No se observa	Muy alta	Sódico	Permeable	
	Eucalipto	M-1	No aceptable	Moderada	Bien drenado	No se observa	Alta	Sódico	Permeable	
	Avena	M-12	No aceptable	Moderada	Muy pobremente drenado	No se observa	Alta	Sódico	Semipermeable	
	Riego	M-10	No aceptable	Moderada	Moderadamente drenado	Moderadamente profundo	Alta	Sódico	Permeable	
	Ciencia	M-8	No aceptable	Moderada	Moderadamente drenado	Moderadamente profundo	Alta	Sódico	Permeable	

El análisis en conjunto de las diferentes características de los suelos con fines de uso y manejo permitió establecer los siguientes grupos de manejo:

Grupo I: no presenta limitaciones graves que les impida el uso y manejo adecuado, pero debe tenerse en cuenta que presenta resistencia mecánica a la penetración. Los problemas de mal drenaje se pueden solucionar con adecuadas prácticas de drenaje como el establecimiento de canales. La conductividad hidráulica está favoreciendo la retención de humedad e infiltración, lo que afecta la fertilidad de estos suelos, porque es una propiedad que se relaciona con el movimiento del agua hacia las raíces de las plantas, la entrada del agua en el suelo y el flujo de agua de drenaje, entre otras, por lo tanto, es importante tener en cuenta estos problemas físicos en el momento de preparar el suelo para la siembra empleando subsoladores, que es un instrumento de labranza vertical, para romper las capas compactadas del suelo y evitar el daño de la estructura del suelo. En cuanto a especies de cultivos es preferible aquellos que no tengan un sistema radicular muy profundo, como pastos, hortalizas como la alfalfa, el apio, avena, berenjena, maíz dulce y de grano, pimiento, rábano, trigo y especies leñosas como ciruelo etc., que se adecuen a estas características del suelo. Pertenecen a este grupo las UCS: Rábano (M-7; Figura 3), Ovejas (M-6) y Humedal (M-2), Invernadero (M-4).

Grupo III: presenta problemas de sales y sodio que deben corregirse con drenaje y enmiendas, de tal manera que, al tratar el suelo con una enmienda como el yeso para sustituir el sodio. El drenaje y el riego deben evitar la acumulación de sales. La ventaja de este suelo es que es moderadamente bien drenado y el nivel freático moderadamente profundo. Se requieren cultivos que se adapten a estas condiciones y cuyas raíces no profundicen mucho como algunas especies de hortalizas, por ejemplo, cebada, remolacha azucarera. Pertenecen a este grupo la UCS acacia (M-14; Figura 5).

Grupo IV: Se caracterizan por problemas de compactación y sodicidad, requieren un manejo que facilite la penetración de las raíces de las plantas y también asegurar un buen drenaje para eliminar los excesos de sodio, mediante lavados y utilización de yeso (SO₄Ca), como enmienda para reemplazar el sodio en los sitios de intercambio, por calcio.

Esta es la manera más adecuada y recomendable para tratar de mejorar los suelos, además utilizar cultivos que se adapten a estas condiciones como la remolacha azucarera, que requiere de sodio en su nutrición, ayuda a disminuir la presencia del elemento en el suelo. Pertenecen a este grupo las UCS: abeja (M-15), feijoa (M-5), eucalipto (M-1), avena (M-12; Figura 6), riego (M-10), ciencia (M-8).

Figura 2 - Grupo de usos y manejo del CAM

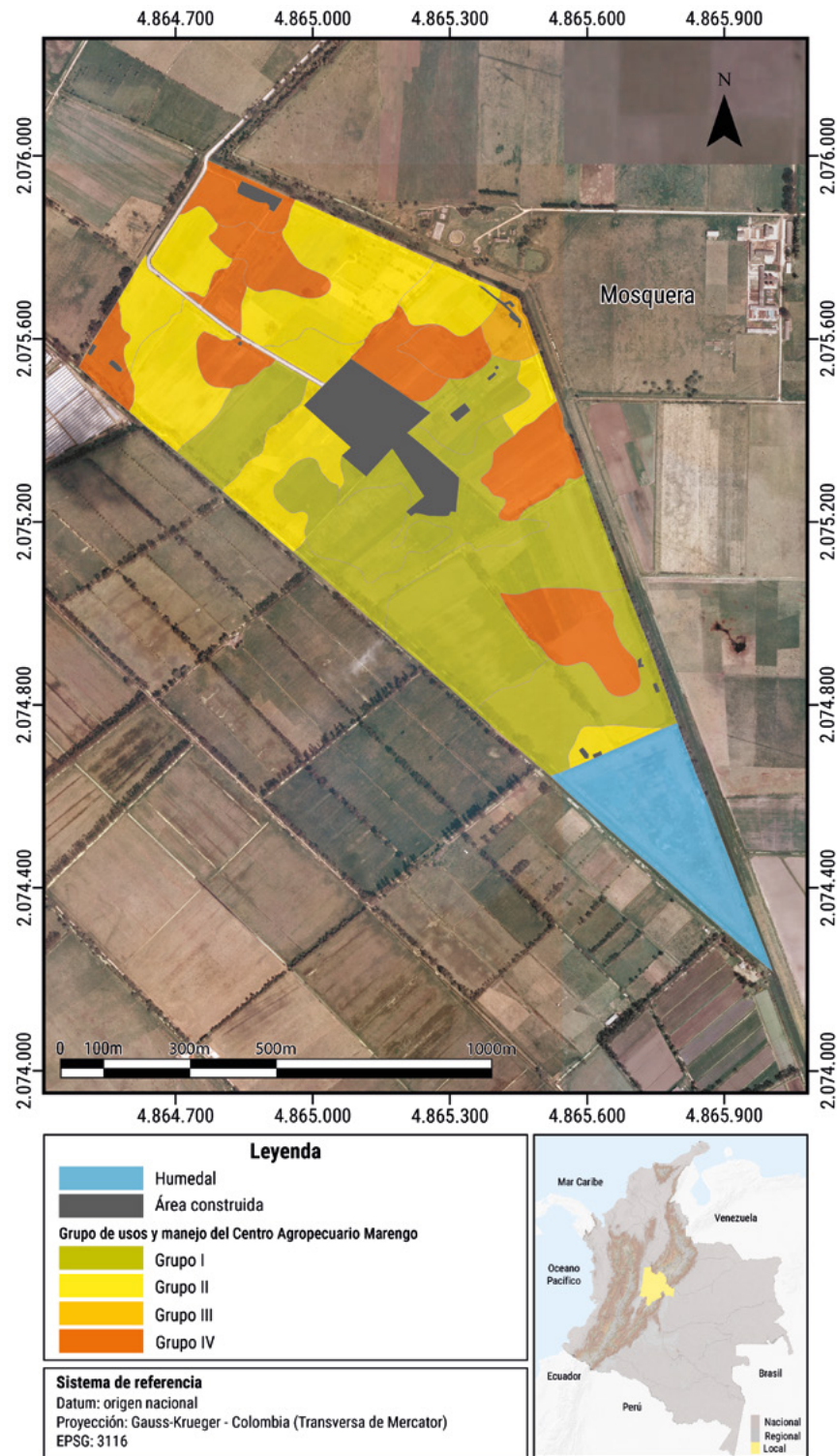


Figura 3 - Perfil M-7 Consociación rábano

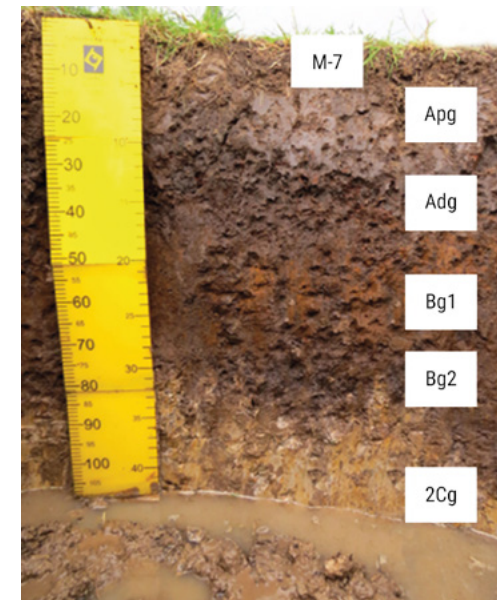


Figura 5 - Perfil M-14 Consociación acacia

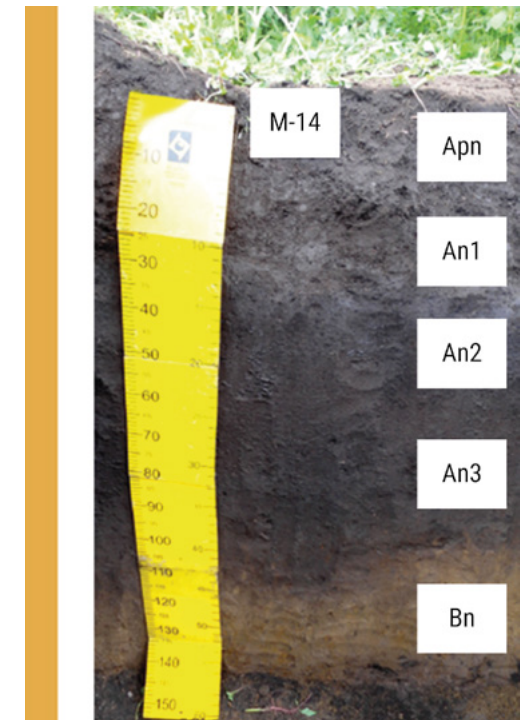


Figura 4 - Perfil M-13 Consociación ganado

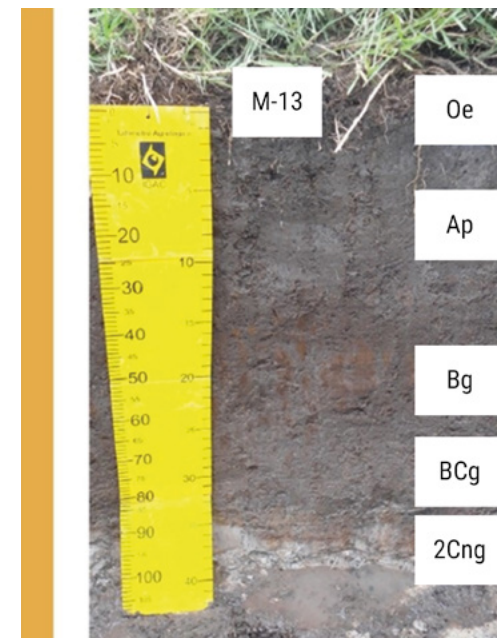
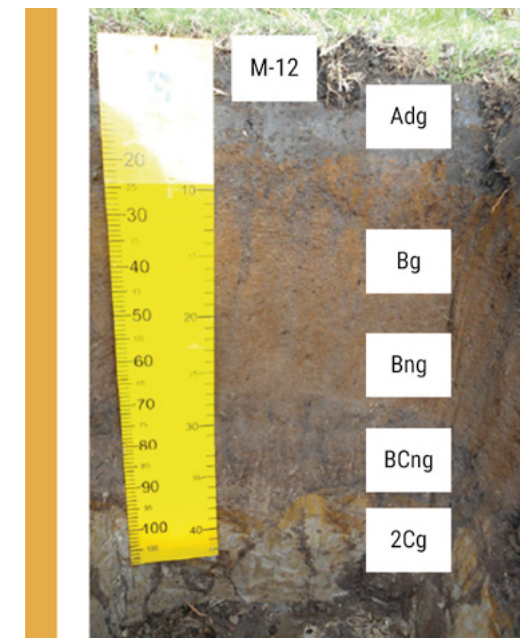


Figura 6 - Perfil M-12 Consociación avena



Conclusiones

Los suelos del *grupo I* presentan una estabilidad estructural que varía de estable en los primeros horizontes, a moderadamente estable en profundidad, se considera que los suelos agrupados en este grupo no poseen limitaciones severas para su uso y manejo. es conveniente realizar un manejo adecuado de los sistemas de drenaje, planes de fertilización acorde con las necesidades de los cultivos, implementar prácticas de mínima labranza.

Los suelos del *grupo II*, presentan salinidad ligera y moderada, que puede ser corregida con un riego superficial y que se asegure un buen drenaje, mediante apertura de canales paralelos a la zona que se va a cultivar y a la cual se le debe realizar un aporte que facilite el drenaje del suelo. A la vez utilizar cultivos que se adapte a estas condiciones.

El drenaje superficial acorde con la descripción en campo de los suelos del *grupo III* se produce por un exceso de agua en el interior del suelo, debido a la presencia de la capa freática fluctuante, saturación de sales y sodio, en condiciones de mal drenaje, que produce una deficiencia de oxígeno y una acumulación de CO₂ que perjudica la respiración y la absorción de agua y nutrientes por las raíces. El manejo de estas condiciones debe incluir riego por goteo, con agua libre de sales, que garantice el lavado de las sales hacia los canales de drenaje.

Recomendaciones

Es conveniente realizar un manejo adecuado de los sistemas de drenaje, planes de fertilización acorde con las necesidades de los cultivos, implementar prácticas de mínima labranza.

Se deben establecer drenajes que permitan eliminar los excesos de agua, tanto del perfil del suelo como de la superficie del terreno, con el objeto de mantener las condiciones de aireación y actividad biológica que garanticen una buena producción de cultivos.

El suelo que presenta condiciones salinas puede recuperarse con una adecuada combinación de drenaje y riego. Si el suelo es sódico, el drenaje permite el lavado de las sales después de la aplicación de enmiendas químicas.

El sistema de drenaje abierto en suelos que presentan niveles freáticos permanentes a profundidades menores de un metro es el más recomendado. Construcciones de diques, drenes abiertos y drenes entubados reducen el contenido de sales y de sodio.

En cuanto al sistema de riego más adecuado para estos suelos que presentan problemas de niveles freáticos fluctuantes y suelos pesados, es el riego por goteo, de tal manera que en tiempos cortos de suministro se pueda proveer el agua suficiente al cultivo; pero es indispensable que el agua que se utilice para el riego no tenga altos contenidos de sales. Esto con el fin de no crear problemas secundarios como anegamiento y deficiente aireación. Los riegos frecuentes mantienen un nivel alto de agua, en la zona radicular y reducen la posibilidad de que forme un estado de escasez en la planta. Este riego según las características de infiltración de los suelos aplica el agua con mayor precisión que si se tratara de un goteo por aspersión.

Referencias

Astier-Calderón, M., Maass-Moreno, M. y Etchevers-Barra, J. (2002). Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia*, 36(5), 605-610.

Brady, N. C. y Weil, R. R. (1999). *La naturaleza y las propiedades de suelos*. Nueva Jersey, Prentice-Hall.

Doran, J. W., Safley, M., Pankhurst, C. E., Doube, B. M. y Gupta, VV. (1997). Defining and assessing soil health and sustainable productivity. En C. Pankhurst, B. M. Doube, y V. V. S. R. Gupta (Eds) *Biological Indicators of Soil health* (pp. 419-435). CABI International.

Dumanski, J., Gameda, S. y Piere, C. (1998). *Indicators of Land Quality and Sustainable Land Management*. Washington, D. C., The World Bank.

Etchevers Barrera, J. D., Hidalgo C., Pajares, S., Gallardo, J., Vergara, M., Bautista, M. y Padilla J. (2009). Calidad o salud del suelo: conceptos, indicadores y aplicación. En J. López Blanco y M. de L. Rodríguez Gamiño (Coord), *Desarrollo de indicadores ambientales y de sustentabilidad en México* (pp.107-122). Instituto de Geografía- Universidad Nacional Autónoma de México.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2016). *Degradación del suelo*. Portal de suelos de la FAO de <https://acortar.link/hzrVoR>

Ferreras, L., Toresani, S., Bonel, B., Fernández, E., Bacigaluppo, S., Faggioli, V. y Beltrán, C. (2009). Parámetros químicos y biológicos como indicadores de calidad del suelo en diferentes manejos. *Ciencia del Suelo*, 27(1), 103-114.

Gregorich, E. G., Carter, M. R., Angers, D. A., Monreal, C. M. y Ellert B. H. (1994). Towards a Minimum Data Set to Assess Soil Organic Matter Quality in Agricultural Soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 74(4), 367-385. <https://doi.org/10.4141/cjss94-051>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2014). *Monitoreo y seguimiento del estado de la calidad de los suelos*. Ecosistemas. de <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/monitoreo-seguimiento-estado-calidad-suelos>

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2010). *Instructivo para los levantamientos de suelos (Manual de códigos)*. <https://es.scribd.com/document/479024798/Instructivo-para-los-levantamientos-de-suelos-Manual-de-Codigos>

Malagón, D. (2016). *Suelos y tierras de Colombia*. (Tomo 2). Subdirección de Agrología- Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

Moreno, C., González, M. I. y Egido, J. A. (2015). Influencia del manejo sobre la calidad del suelo. *Ecuador es calidad: Revista Científica Ecuatoriana*, 2(1), 33-40.

Ordoñez Delgado, N. y Bolívar Lucero, A. (2014). *Levantamiento Agrológico del Centro Agropecuario MARENGO (CAM)*. Bogotá, Universidad Nacional de Colombia e Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

Ortiz Solorio, M., Anaya Garduño, M. y Estrada Berg Wolf, J. W. (1994). *Evaluación, cartografía y políticas preventivas de la degradación de la tierra*. Texcoco, Edo. México: Colegio de Postgraduados.

Peinemann, N., Díaz-Zorita, M. Villamil, M. B., Luserreta, H. y Grunewald, D. (1998). Consecuencias del riego complementario sobre propiedades edáficas en la Llanura Pampeana. *Ciencia del Suelo*, 16(1), 39-42.

Pepi, M. L., Grosso, G. A. y Díaz-Zorita, M. (1998). Contenido salino del agua freática vinculado al tamaño de partículas de los suelos del noroeste bonaerense (Argentina). *Ciencia del Suelo*, 16(2),122-124.

Pla Sentís, I. (2010). *Metodología para la caracterización física de diagnóstico y problemas de manejo y conservación de suelos en condiciones tropicales*. Universidad Central de Venezuela.

Porta Casanellas, J. y López-Acevedo Reguerin, M. (2005). *Agenda de suelos. Información de suelos para la agricultura y el medio ambiente*. Madrid, Mundi Prensa.

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales y Colegio de Posgraduados. (2002). *Memoria Nacional 2001-2002. Evaluación de la degradación de la tierra causada por el hombre en la República Mexicana. Escala 1:250.000*. Ciudad de México, Memoria Nacional.

Stocking, M. y Murnaghan, N. (2003). *Manual para la evaluación de campo de la degradación de la tierra* (C. Padilla y J. Abadejo, Trad). Editorial Mundi-Prensa (Obra original publicada en 2001).

Taboada, M. A. (2008). *Funcionamiento de los suelos salinos y sódicos*. Instituto de Suelos, entro de Investigación de Recursos Naturales-Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria CIRN-INTA. <https://acortar.link/qNizpr>

Zavala-Cruz, J., Palma-López, D. J., Fernández Cabrera, C. R., López Castañeda, A. y Shirma Tórres, E. (2011). *Degradación y conservación de suelos en la cuenca del río Grijalva. Tabasco*. Gobierno del Estado de Tabasco, Secretaría de Recursos Naturales y Protección Ambiental, Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco, Petróleos Mexicanos.

Zinck, J. A. (2014). Suelos, información y sociedad. *Suelos Ecuatoriales*, 44(2), 113-124

Anexos

Anexo 1 - Clasificación de suelos a partir del contenido de sales y sodio

Parámetros	Salino	Normal	Sódico	Salino-sódico
pH	< 8,5	< 8,5	> 8,5	> 8,5
CE (dS/m)	> 4	< 4	< 4	> 4
PSI (%)	< 15	< 15	> 15	> 15

Fuente: IGAC, 2010.

Anexo 2 - Parámetros de evaluación de tierras que inciden en la compactación de los suelos

Parámetros	Salino	Normal símbolo	Sódico	Salino-sódico	Parámetros	Salino
Restricción al crecimiento radicular en 30 cm superficial	RMP (MPa)	b	Excelente (0 a 0,7)	Aceptable		
(0,7 a 1,2) (0,7 a 2,5)	No aceptable (1,3 a 2,5)	Inhibición al crecimiento radicular (>2,5)				
Textura	Ar (%)	h	FA a FAr	FA a Ar permeable (40<%Ar < 50)	FA a Ar semipermeable (%Ar > 50)	-
Retención de agua	AD (%)	q	AD > 12,5	AD > 9,4	AD > 6,3	AD < 6,3
Infiltración de agua en el suelo	ib (cm h ⁻¹)	i	Rápida (12,7 < ib < 25,4)	Moderada (2 < ib < 12,7)	Muy rápida (ib > 25,4) Lenta (0,1 < ib < 2)	Muy Lenta (ib < 0,1)
Fertilidad	Fertilidad	y	-	-	-	-
Sodicidad	PSI (%)	a	-	-	-	-
Salinidad	CE (dS m ⁻¹)	S	CE < 2	CE < 4	CE < 8	CE > 8

Fuente: FAO, 2016.

Nota: RMP: resistencia mecánica a la penetración; Text: textura; AD: agua disponible; ib: infiltración básica; Fert: fertilidad; PSI: porcentaje de sodio intercambiable; S: salinidad.

Anexo 3 - Parámetros de evaluación de tierras que inciden en la compactación de los suelos

Características	Profundidad	Código	Perfiles
Nivel freático	No se observa	6	M-15, M-14, M-13, M-7, M-6, M-5, M-1, M-11, M-12
	Superficial 25-50 cm	2	M-2, M-3, M-9
	Moderadamente profundo 0-100 cm	3	M-4, M-10, M-8
Drenaje natural	Imperfectamente drenado	11	M-3, M-15, M-13, M-8, M-9
	Moderadamente drenado	12	M-4, M-10
	Muy pobremente drenado	9	M-7, M-6, M-2, M-12
	Bien drenado	13	M-14, M-5, M-1, M-11

Anexo 4 - Evaluación de sales y sodio para uso y manejo

Características	Conductividad eléctrica CE	Saturación de sodio PSI	Perfiles	Clase
Salinidad	0-2	< 15	M-3, M-4, M-6, M-2, M-7	Normal
	2-4	< 15	M-13,	S1 Ligeramente salino
	4-8	< 15	M-11, M-9	S2 Moderadamente salino
Salino sódico	8-16	> 15	M-14	S2 NA
Sódico	0-2	> 15	M-5, M-12, M-15, M-10, M-8, M-1	NA

Anexo 5 - Calificación de las distintas UCS con fines de uso y manejo

Calificaciones de nivel freático, drenaje natural, salinidad y sodicidad	Clases
6 - 9 - N	I
6 - 9 - N	I
2 - 9 - N	I
6 - 11 - S1	II
6 - 13 - S2	II
2 - 11 - S1	II
3 - 12 - N	II
2 - 11 - S2	II
6 - 11 - Na	III
6 - 11 - Na	III
6 - 13 - Na	III
6 - 9 - Na	III
3 - 13 - S2Na	III
3 - 12 - Na	III

Nota: interpretación de las calificaciones: 6: no se observa el nivel freático; 3: nivel freático moderadamente profundo; 2: nivel freático superficial; 11: imperfectamente drenado; 12: moderadamente drenado; 9: muy pobremente drenado; 13: bien drenado.



Comparación de metodologías de aptitud de uso del suelo: hacia un enfoque alternativo, basado en la implementación de la Metodología Cervatana Modificada (MCM), municipio de Puerto Gaitán, Meta

Comparison of Land-use Suitability Methodologies: Towards an Alternative Approach, Based on the Implementation of the Modified Cervatana Methodology (MCM), Municipality of Puerto Gaitan, Meta

Alfonso López Moreno¹ 

Resumen

En Colombia, la región de la Orinoquia es una extensa reserva de recursos, destacándose tierras aptas para la producción y de biodiversidad. Cuenta con 26 millones de hectáreas, de las cuales el 53% corresponde a la altillanura bien drenada. Al interior se encuentra el municipio de Puerto Gaitán (Meta), cubriendo un área de 443560 ha para este estudio. La investigación consistió en realizar un análisis comparativo de aptitud del suelo, entre resultados del Instituto Geográfico Agustín Codazzi para 2013 y los obtenidos con la Metodología Cervatana Modificada, buscando un enfoque alternativo o complementario, dentro de un marco de desarrollo sostenible. Se utilizó información base y temática a escala 1:25.000, el Sistema de Información Geográfica, método Delphi y el Análisis Multicriterio. El análisis comparativo arrojó mejores escenarios para la Metodología Cervatana Modificada, destacándose el incremento de las clases de clasificación para zonas altamente productivas, como es la S2 para la producción agrícola y zonas específicas para la conservación. La investigación concluye que la hipótesis planteada, del uso de una metodología como la Metodología Cervatana Modificada, aprovecha de manera significativa la sinergia, en cuanto a insumos y metodologías utilizadas, para la obtención de escenarios potenciales de uso.

Cómo citar

López Moreno, A. (2024). Comparación de metodologías de aptitud de uso del suelo: hacia un enfoque alternativo, basado en la implementación de la Metodología Cervatana Modificada (MCM), municipio de Puerto Gaitán, Meta. *Análisis Geográficos*, 57(1), 84 - 100.

Abstract

In Colombia, the Orinoquia region is an extensive reserve of resources, including land suitable for production and biodiversity. It has 26 million hectares, of which 53% corresponds to the well-drained highlands. The municipality of Puerto Gaitán (Meta) is located in the interior, covering an area of 443,560 ha for this study. The research consisted of a comparative analysis of soil suitability, between the results of the Agustín Codazzi Geographic Institute for 2013 and those obtained with the Modified Cervatana Methodology, seeking an alternative or complementary approach, within a framework of sustainable development. The Modified Cervatana Methodology used: base and thematic information at a scale of 1:25,000, use of the Geographic Information System, Delphi Method, and Multicriteria Analysis. The comparative analysis yielded better scenarios for the Modified Cervatana Methodology, highlighting the increase in classification classes for highly productive zones, such as (S2) for agricultural production and specific zones for conservation. The research concludes that the hypothesis proposed, the use of a methodology such as the Modified Cervatana Methodology, significantly takes advantage of the synergy, in terms of inputs and methodologies used, to obtain potential scenarios of use.

Keyword:

land use suitability, Modified Cervatana Methodology, Delphi Method, Geographic Information System, Multicriteria Analysis.

Introducción

Partiendo de la premisa de que un desarrollo sostenible se basa en definir proyectos viables haciendo énfasis en la reconciliación entre el bienestar económico, los recursos naturales y la sociedad, en la que también se puede desarrollar metodologías alternativas en la determinación del uso del suelo, en un marco de la preservación de la biodiversidad, determinando escenarios de ocupación del suelo óptimos (Ramos-Reyes, 2016).

En esta búsqueda se hace necesario la utilización de metodologías modernas de evaluación de aptitud de uso del suelo, apoyadas en tecnologías como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), metodologías matemáticas de decisión como el Análisis Multicriterio (AM), que coadyuvan al mejoramiento sustancial en los resultados óptimos esperados en este tipo de investigaciones en comparación con los métodos de cálculo de aptitud de uso tipo FAO.

El problema de investigación planteado en este trabajo se focaliza en la búsqueda de escenarios óptimos para la aptitud de uso de la tierra, enmarcados en el desarrollo sostenible, basado en el análisis comparativo entre los resultados obtenidos por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2013b), en su proceso de evaluación de aptitud de tierras donde se utilizó la metodología para evaluación de tierras (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 1985), modificada y adaptada por el IGAC y la metodología desarrollada en este trabajo de investigación, la cual corresponde a la Metodología Cervatana Modificada (MCM) (De la Rosa et al, 2009), donde su fundamento es la definición general del uso de las tierras basado en nueve variables biofísicas, apoyado en el SIG, el Análisis Multicriterio y el apoyo conceptual de expertos en el tema a través del método Delphi.

La búsqueda de escenarios óptimos mediante la utilización de metodologías alternativas, pretende generar información que pueda ser usada como resultados principales de aplicación directa en la planificación o en su defecto ser un aporte complementario a los resultados oficiales desarrollados por las instituciones responsables del tema, o cualquier otra entidad pública o privada que requiera dicha la información.

Metodología

La metodológica utilizada en esta investigación, tuvo como objetivo principal realizar un estudio comparativo de los resultados de aptitud de uso del suelo con énfasis agrícola, entre los estudios realizados para el tema por el IGAC en 2013 desarrollado con la metodología de la FAO (1985) y la metodología desarrollada en este trabajo de investigación basado en la MCM.

Esta investigación buscó, de una forma teórica, de acuerdo a los resultados de comparación, cuantificar y corroborar que la utilización de metodologías alternativas no FAO como la MCM, con el apoyo del uso del SIG (ArcGis 10.3), metodologías matemáticas de decisión como AM y las recomendaciones de expertos aplicando el método Delphi, generar resultados óptimos para los escenarios de producción agrícola en el marco de la sostenibilidad ambiental, como ya se había mencionado.

Los SIG apoyaron todo el desarrollo cartográfico y de análisis de toda la información involucrada en la investigación, el uso del AM se utilizó para la síntesis de sus cuatro factores finales: pendiente, suelo, riesgo de erosión y deficiencia bioclimática, realizando tabulaciones cruzadas para su definición, también se hizo uso del SIG con fines de procesamiento de la información. Otro aspecto fundamental fue las reuniones con el panel de expertos utilizando el método Delphi, cuyo objetivo fue evaluar discutir, evaluar y definir las diferentes combinaciones posibles en la evaluación de la matriz de los nueve factores biofísicos, donde el producto fue una matriz resumida donde la información presentada fueron: las categorías de uso, las diferentes agrupaciones definidas en el Metodología Cervatana Modificada y sus diferentes usos principales definidos, también un segundo producto importante fue la conformación del listado de los tipos de utilización (cultivos) más adecuados para implementar en la zona de estudio.

Finalmente, con base en los resultados del proceso de comparación y del inventario de cultivos, resultado de la participación del grupo de expertos, se analizaron, evaluaron y desarrollaron unas recomendaciones generales de implementación de actividades productivas agrícolas en la zona de estudio.

Palabras clave:

aptitud de uso de la tierra, Metodología Cervatana Modificada, método Delphi, Sistema de Información geográfica, Análisis Multicriterio.

Es importante resaltar que esta metodología se concentra en los aspectos biofísicos, agroclimáticos, de optimización en la producción y la conservación del medio ambiente, y su objeto es ofrecer la base esencial necesaria para una buena planificación, sobre la cual pueden apoyarse más tarde consideraciones económicas y sociales más detalladas.

Área de estudio

La zona de estudio, comprende una extensión de 443560,69 ha. Esta se encuentra localizada entre las coordenadas: 4° 50' 29,05" norte, 4° 3' 34" sur, -71°44,0,23" este y -72° 3' 52" oeste. Comprende una franja ubicada hacia el nororiente del municipio de Puerto Gaitán (Meta) que limita al norte con el río Meta, al oriente con el departamento del Vichada, al occidente con la vía que conduce hacia Rubiales a partir del punto llamado Alto de Neblinas y al sur con la altillanura disectada, llamada comúnmente serranía. Como se puede observar en la Figura 1.

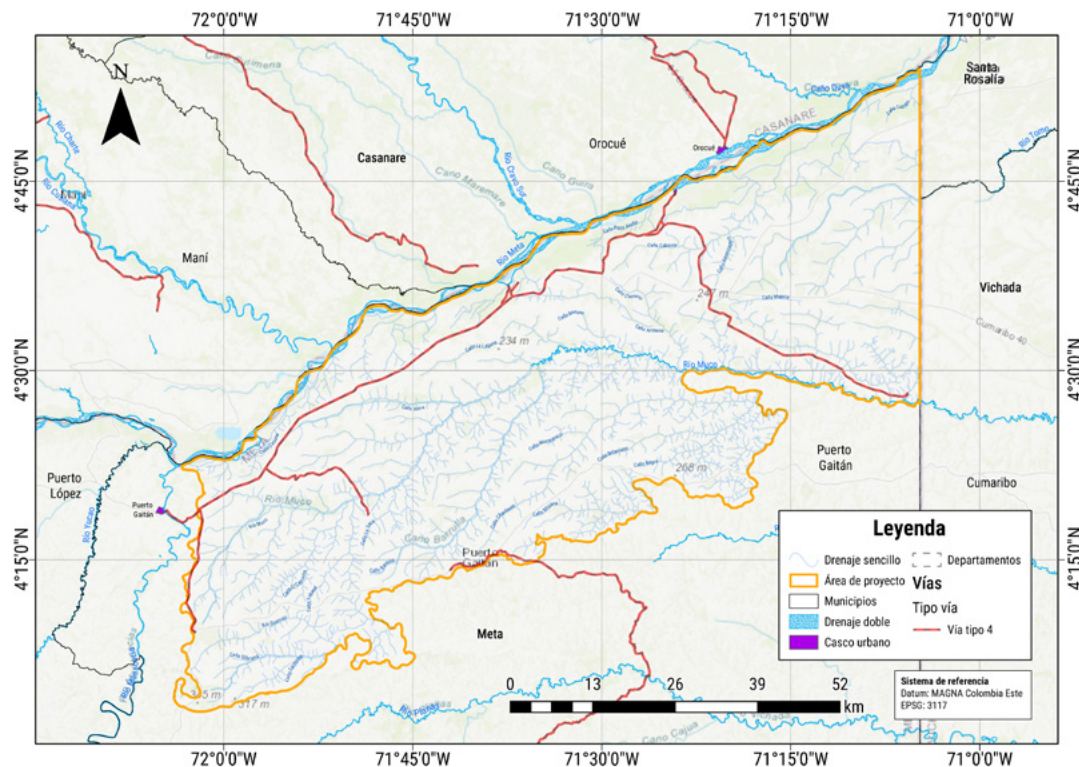
Desarrollo de la metodología general de la investigación

A continuación, se presenta la metodología implementada en la investigación como se puede observar en la Figura 2 y se enumera a continuación.

1. Consulta, revisión y adecuación de la información del estudio de aptitud de uso (IGAC, 2013b).
2. Consulta, revisión y definición de metodologías de aptitud de uso a utilizar, y definición de método a modificar e implementar.
3. Revisión y preparación de información de estudios de suelos y evaluación de aptitud de uso, disponible en el IGAC y otra información como insumos en el desarrollo de la metodología de esta investigación.
4. Evaluación de la ocupación del suelo MCM. (De la Rosa et al., 2009).
5. Proceso de comparación entre los resultados de las dos metodologías.
6. Recomendaciones generales basados en los resultados del proceso de comparación en cuanto a propuestas en los escenarios de AU agrícola, con base en las recomendaciones de cultivos modales y potenciales, definidos por el panel de expertos que participo en la investigación.

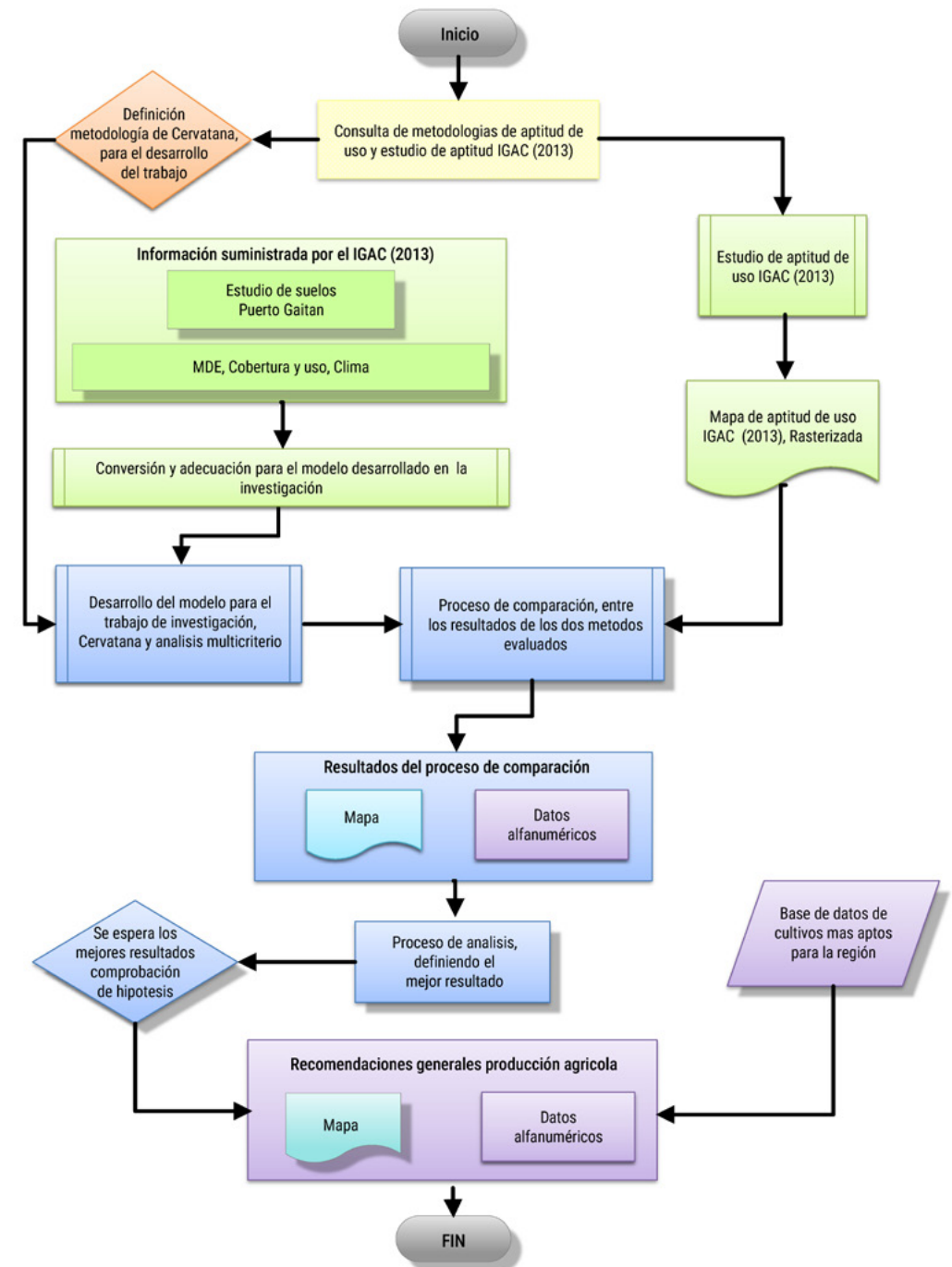
Consulta, revisión y adecuación del estudio de aptitud de uso La primera etapa desarrollada en la investigación fue revisar los resultados de la evaluación de la aptitud de las tierras desarrollado por el IGAC en 2013. Con el fin de analizar y estructurar esta información

Figura 1 - Localización área de proyecto



Fuente: elaboración propia con base en el igac, 2013a.

Figura 2 - Metodología general detallada



para el desarrollo del proceso de comparación. El IGAC determinó la aptitud de uso del suelo para la zona plana del municipio de Puerto Gaitán - Meta, como ya se había mencionado tomando como base de desarrollo de su estudio la metodología FAO (1985), donde una de sus principales definiciones de Unidad de aptitud de uso (UAU), esta es la capacidad de una unidad de tierra para una clase especificada de utilización, información homologable con la MCM.

Básicamente se revisó la información de las memorias técnicas en conjunto con la correspondiente cartografía, se tomó el campo en la tabla de la capa geográfica denominado Capacidad y con ayuda del SIG se conformó el shape para esta información, cuyo resultado se puede apreciar en la Figura 3.

Esta capa de información requirió un proceso adicional, el cual consistió en la homologación y recodificación de la información, de acuerdo a la MCM, en cuanto a los parámetros limitantes de los UAU. Se aplicaron los cambios a la capa en cuestión de acuerdo a la Tabla 1.

Tabla 1 - Homologación y recodificación de la información, de acuerdo a la MCM

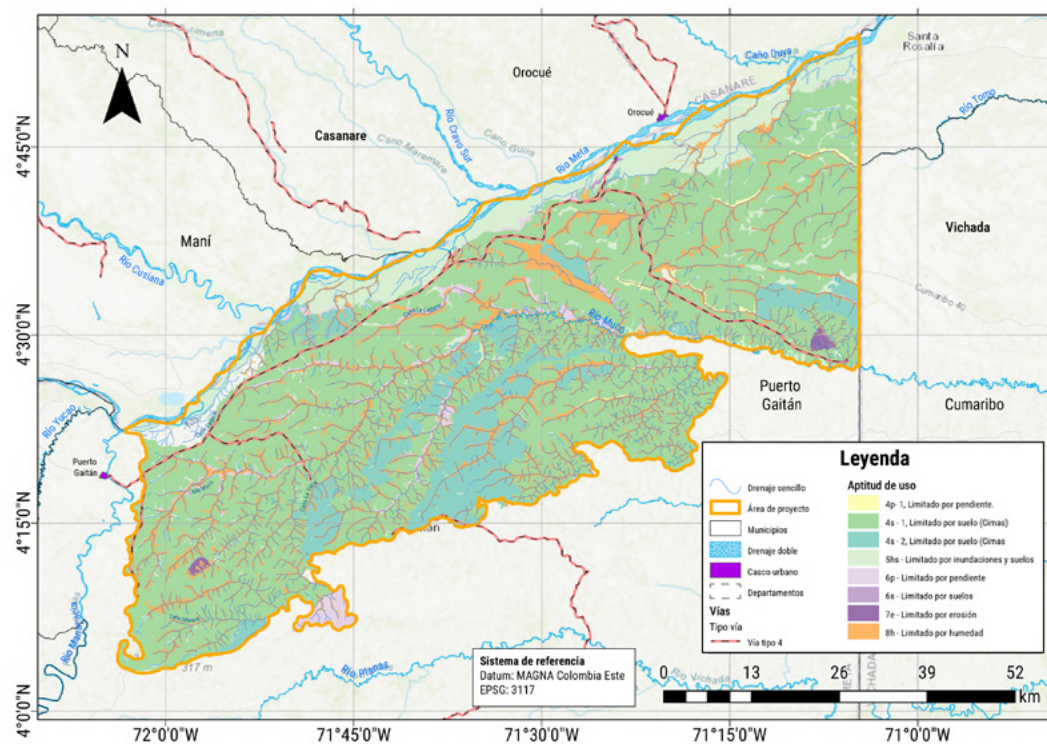
Limitante	Código IGAC	Código Cervatana Modificada
Topografía	m	t
Erosión	e	r
Suelo	n	l
Clima	No fue considerado	b

Fuente: IGAC, 2013a.

Consulta, revisión y definición de metodologías de evaluación de tierras a utilizar

En una segunda etapa en el desarrollo de la investigación, se realizó una revisión bibliográfica en el tema de las metodologías de evaluación de tierras, aptitud de uso del suelo con fines de producción agrícola y clasificación de suelos.

Figura 3 - Mapa de aptitud de uso



En este orden de ideas finalmente se decidió utilizar el esquema metodológico de evaluación de la aptitud de uso de suelo, el Metodología Cervatana modificada (De la Rosa et al., 2009). Este método está basado en una evaluación de la capacidad general de uso, que se entiende como la aptitud de los suelos para una serie de usos.

Técnicamente esta metodología en su desarrollo se apoya en el uso del Análisis Multicriterio Método (cualitativo) para la síntesis de sus cuatro factores finales: pendiente, suelo, riesgo de erosión y deficiencia bioclimática, realizando tabulaciones cruzadas para su definición, también haciendo uso del SIG con fines de procesamiento de la información, resultando una plataforma metodológica de manejo y análisis de información temática y geográfica robusta y de muy alto nivel.

Revisión y preparación de información IGAC y otras fuentes de información para el desarrollo del Metodología Cervatana Modificada desarrollado en la investigación

En el desarrollo de esta investigación se utilizaron diversos materiales y fuentes de información geográfica y un inventario de cultivos consolidado, de acuerdo a la recomendación de los expertos, con fines de producción en la zona de estudio. La gran mayoría de insumos (estudios y cartografía) fueron suministrados por el IGAC, pero también se utilizó información para el tema de erosión, tomada del Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC) estudio desarrollado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) en los años 2010 y 2011, estudio de suelos semidetallado (IGAC, 2013a), MDE, Mapa de cobertura y uso y distribución espacial de precipitación y evapotranspiración (Total anual) para el municipio de Puerto Gaitán y Mapa de zonificación de los suelos por grado de erosión escala 1:50.000 para Colombia (IDEAM, 2011). En general toda esta información se procesó en formato ráster con una estandarización de 20 x 20 m, en resolución espacial para todas las capas trabajadas en la investigación.

Para el tema de suelos se tomaron los parámetros de profundidad efectiva, textura del suelo, pedregosidad y drenaje, para la conformación final del parámetro suelo dentro del MCM. Adicionalmente se derivaron los mapas de erodabilidad basado en el método de Paulet (1973), el cual se basa para su cálculo en tres parámetros de suelo: % de arena, % de limo y la densidad aparente dada en (g/cm³), Y la capa de limitantes para la producción agrícola, definidos en la metodología y están discriminados de la siguiente manera, limitantes por: pendiente, erosión, suelo y por clima. Enseguida dentro del procedimiento como resultado final de esta etapa, se crearon seis capas en formato ráster.

El mapa de pendientes fue resultado del procesamiento del MDE, examinando las diferencias de altitud entre cada pixel central y la de cada uno de sus vecinos, calculando el gradiente de la pendiente máxima, en porcentaje, en las dos direcciones básicas: norte-sur y este-oeste (Intergraph, 1994). La información de uso y cobertura se procesó de acuerdo a los parámetros de reclasificación con el fin de generar el mapa densidad de la vegetación contemplados en el MCM. Se realizó un proceso de reclasificación de acuerdo con el porcentaje de cobertura de cada una de sus categorías o la fracción de superficie cubierta por cada tipo de vegetación. La información utilizada para la distribución

espacial de precipitación y evapotranspiración (total anual), fue suministrada por el IGAC, en las capas de información geográfica de distribución espacial de precipitación y evapotranspiración potencial total anual, en su versión del año 2013.

El desarrollo del factor de deficiencia bioclimática para efectos de la investigación, fue basado en los conceptos expresados por Thornthwaite (1948), donde se define que la ETP es un parámetro climático que se analiza a partir del balance hídrico y permite determinar las pérdidas de agua desde una superficie de suelo. La información para el desarrollo del mapa de erosión se desarrolló a partir de la información encontrada en el sitio web del gobierno colombiano: <http://www.siac.gov.co/catalogo-de-mapas>. En su estudio denominado Zonificación de los suelos por grado de erosión, elaborado por el IDEAM entre los años 2010 y 2011.

Seguidamente se tomó la información de erosión encontrada en el estudio del IDEAM, 2010 – 2011, para la zona de proyecto, se reclasificó de acuerdo a los parámetros establecidos en el Modelo Cervatana Modificado en su factor de erosividad de acuerdo a los rangos establecidos.

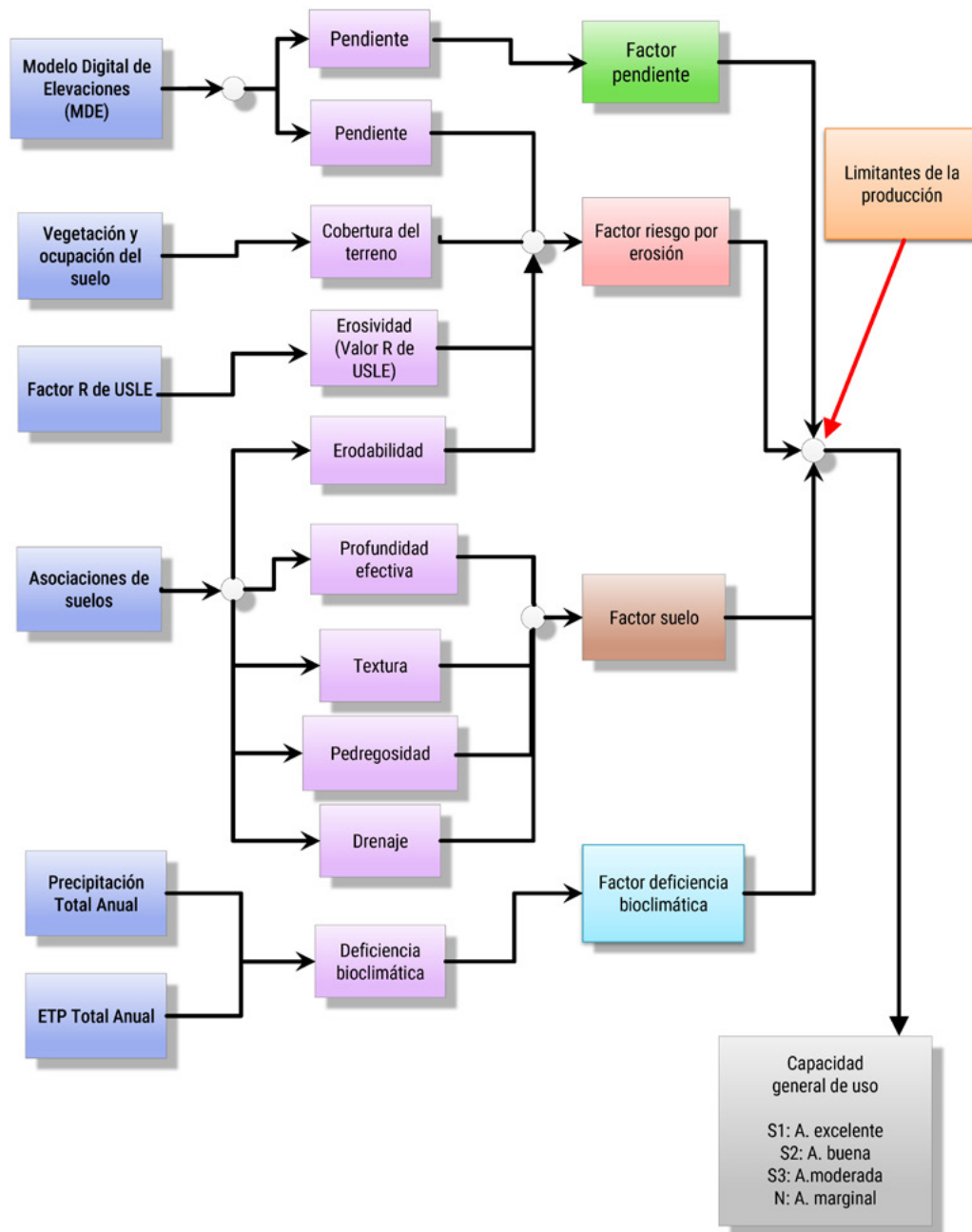
Evaluación de la ocupación del suelo MCM

Metodológicamente se decidió utilizar el método propuesto por Cervatana (De la Rosa et al., 2009), de acuerdo a los objetivos definidos en esta investigación y después de estudiar, analizar diversas metodologías enfocadas a la determinación de áreas o zonas de aptitud de uso del suelo con fines agrícolas, se definió que la MCM es la más adecuada porque esta resultado ser novedosa, moderna, acorde con las nuevas tecnologías como los SIG, está incluida la implementación del AM y también considera la participación de expertos en el desarrollo del mismo, mediante el uso de la metodología Dephi. Adicionalmente tiene características y aspectos técnicos y de similitud que facilitan el proceso de comparación con los resultados del estudio de aptitud de uso de los suelos desarrollado por el IGAC en el 2013.

Se denominó “modificada” la MCM, porque no se tuvieron en cuenta dos aspectos de la metodología Cervatana original: el tema de riesgos de heladas, en el tema de la deficiencia bioclimática, ya que, en esta latitud del planeta, no se presenta este fenómeno climático y segundo tema descartado, en el para los suelos, fue la salinidad, ya que no se contó en el momento con esta información en el estudio de suelos del (IGAC, 2013a). El propósito de esta metodología como ya se había mencionado fue definir la capacidad general de uso, entendida como la aptitud de los suelos para una serie de usos como: la agricultura, la silvicultura y las funciones ambientales de protección y de conservación. Esta metodología es el resultado de la síntesis de cuatro factores: pendiente, suelo, riesgo de erosión y deficiencia bioclimática. Cada uno de estos factores se han obtenido, a su vez mediante la agrupación de los valores de nueve variables biofísicas: pendiente, cobertura del suelo, erosividad, erodabilidad, profundidad efectiva, textura, pedregosidad, drenaje y deficiencia hídrica y también será incorporado el factor de limitantes de la producción agrícola, como se puede observar en el diagrama de flujo presentado en la Figura 4

Un primer paso en el desarrollo de la Metodología Cervatana Modificada, dentro del desarrollo de la investigación, fue convertir

Figura 4 - Metodología Cervatana modificada implementado en la investigación



Fuente: adaptada de De la Rosa et al., 2009.

de formato vector a ráster los nueve mapas base: pendiente, uso y cobertura, erosividad, erodabilidad, profundidad efectiva del suelo, textura del suelo, pedregosidad del suelo, drenaje del suelo y deficiencia bioclimática, esta información se convirtió en la base para la definición de los cuatro factores finales de la MCM, usando un tamaño común de celda de 20 x 20 m de resolución espacial. Cada celda sirve como unidad geográfica de referencia, considerándose homogénea desde el punto de vista biofísico (De la Rosa et al, 1992). Una segunda fase en la aplicación de la Metodología Cervatana Modificada, consistió en convertir los valores de cada una de las variables (mapas) en una escala común de medida, mediante un proceso de reclasificación. Tomando como directriz general, la asignación de valores iniciales en cada variable con una escala ordinal que va desde el valor 1, cuando no existen limitaciones, hasta 2, 3 o 4, cuando coexisten las limitaciones máximas. Como se puede apreciar en la Tabla 2.

Tabla 2 - Valores finales clasificación Método Cervatana Modificada

Capas de información	Rangos	Valor de reclasificación (Ráster)
Pendiente	< 7%	Clase 1
	7 - 15%	Clase 2
	15 - 30%	Clase 3
	> 30%	Clase 4
Uso y cobertura	> 30% (Elevada)	Clase 1
	30 - 15% (Moderada)	Clase 2
	< 15% (Ligera)	Clase 3
Erosividad (Valor R de USLE)	< 250 (Ligera)	Clase 1
	250 - 300 (Moderada)	Clase 2
	300 - 375 (Fuerte)	Clase 3
	> 375 (Muy fuerte)	Clase 4
Erodabilidad	0,03 - 0,5 (Ligera)	Clase 1
	0,5 - 0,8 (Moderada)	Clase 2
	> 0,8 (Elevada)	Clase 3
Profundidad efectiva	> 75 cm (Elevada)	Clase 1
	(50 - 75 cm) Moderada	Clase 2
	(25 - 50 cm) Escasa	Clase 3
	< 25 cm (Somera)	Clase 4
Textura del suelo	Arcillosos	Clase 1
	Limosos	Clase 2
	Arenosos	Clase 3
Pedregosidad del suelo	Nula o ligera (< 15%)	Clase 1
	Ligera a moderada (15 - 40%)	Clase 2
	Elevada (> 40%)	Clase 3
Drenaje del suelo	Bueno	Clase 1
	Moderado	Clase 2
	Pobre o Excesivo	Clase 3
Deficiencia bioclimática	=> 1	Clase 1
	1 - 0,5	Clase 2
	0,5 - 0,33	Clase 3
	=< 0,33	Clase 4

La MCM, que está fundamentada y articulada como una Capacidad General de Uso (CGU), busca de una forma teórica el escenario más promisorio desde el punto de vista biofísico. En el desarrollo de esta investigación, los resultados de la aplicación de esta metodología se convirtió en el segundo insumo, que sirvió para desarrollar el proceso de comparación contra los resultados obtenidos en el estudio (IGAC, 2013b) homologada en su simbología de acuerdo a la MCM adoptado en la investigación, y de acuerdo a los resultados obtenidos en el proceso de comparación, se establecieron unas recomendaciones generales en el aspecto productivo agrícola, tomando los cultivos más promisorios en la zona de estudio, los cuales fueron determinados bajo la metodología Delphi, con los expertos que participaron en el desarrollo de la investigación. Al final del proceso, se integraron en un mapa o salida cartográfica,

la cual fue obtenida mediante el procesamiento SIG con la ayuda del ArcGis (10.3), desarrollando el AM, propuesto en el proceso metodológico de la investigación, operado con la ayuda del comando de ArcGis (10.3) Weighted Overlay, el cual está diseñado para implementar, desarrollar y evaluar diversas posibles soluciones a un determinado problema, considerando un número variable de criterios, involucrando insumos cartográficos en formato ráster.

Metodología de AM, utilizada en la investigación

En el desarrollo de la investigación se utilizó el Análisis Multicriterio (cualitativo), el cual está enmarcado en los métodos compensatorios aditivos. Este método de forma sistemática obtiene una compensación total entre los factores que forman parte de la combinación. Según Eastman (2000), a su vez se obtiene una compensación total entre los factores previos que formaron parte de las combinaciones iniciales del proceso. Los valores máximos de las variables y factores limitantes son dominantes porque establecen restricciones físicas importantes para la determinación del uso de la tierra, y al final determinan la aptitud de uso optimizada en el área de proyecto.

En cuanto al procesamiento SIG, en esta etapa de la investigación fueron utilizados muchos procedimientos de ArcGis (10.3) como: clips, intersecciones y manejo de las tablas adjuntas de las capas. Para ilustrar el procesamiento se muestra el pantallazo del proceso llevado a cabo para el parámetro suelo, en el software ArcGis (10.3) con su comando (Weighted Overlay), esto se muestra en la Figura 5.

Con fines de ilustrar el proceso se definió como M la variable entera que toma el valor ponderado de los cuatro factores (pendiente, riesgo por erosión, suelo y deficiencia bioclimática); Cada uno de los cuatro factores de entrada se denominaron como: i1 = factor pendiente; i2 = factor riesgo de erosión; i3 = factor suelo; i4 = factor de deficiencia bioclimática, para la definición de la variable final resultado de las 4 nombradas anteriormente con el uso del SIG. Obteniendo M como el nuevo valor de salida a los píxeles de la capa de aptitud de uso del suelo para el metodología adoptado en la investigación, para fines agrícolas y de sostenibilidad.

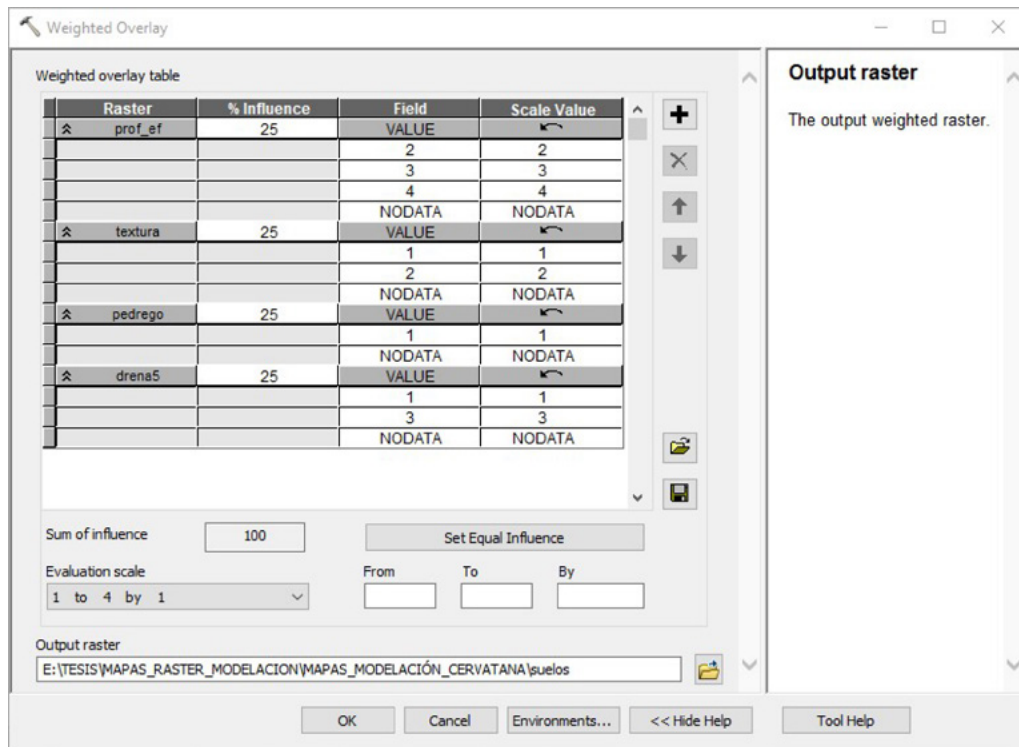
De esta forma, cada píxel tiene un valor final de estimación del proceso de AM, comprendido entre: 1 (mayor capacidad de uso de los suelos y menores limitaciones) y 4 (menor capacidad general de uso como consecuencia de mayores restricciones biofísicas), como se puede detallar en la Tabla 3.

Tabla 3 - Calificación final del MCM, para los 4 factores

1 no hay limitaciones
2 limitaciones leves
3 limitaciones medias
4 limitaciones máximas

Como ilustración del procesamiento del AM, desarrollado con el SIG con ayuda del comando (Weighted Overlay de ArcGis 10.3), se muestra en la Figura 6, un ejemplo de las posibles combinaciones de los factores en nueve unidades de tierra o píxeles imaginarios. Cada celda del mapa final del Metodología Cervatana Modificada toma el valor ponderado de los cuatro factores integrados (pendiente "p", riesgo de erosión "r", suelo "s" y deficiencia bioclimática "b"). Así, por ejemplo, el píxel superior izquierdo de la matriz no tiene ninguna limitación de uso derivada de la pendiente, el riesgo de erosión o el suelo. Sin embargo, sí tiene un déficit bioclimático moderado (valor

Figura 5 - Pantallazo procesamiento en Arcgis (10.3) para el factor suelo



2), como resultado de la escasez de agua en esa unidad tierra. En el mapa de final para la Metodología Cervatana Modificada, esta celda tiene un valor de 2. El valor 1 de este mapa final es equivalente a la clase S1 según De la Rosa et al., (2009).

Esto indica una excelente aptitud de uso. El valor 2 (S2) muestra una buena aptitud de uso del suelo, el valor 3 (S3) una capacidad de uso moderada y el valor 4 (clase n) una capacidad marginal.

Cada dígito de la clase va seguido de uno o varios identificadores (en letras minúsculas) de la subclase o subclases a las que pertenece cada pixel. Estos identificadores indican el factor o factores

que limitan, negativamente, los resultados de la modelación de aptitud de uso de esta unidad de tierra. Si el factor limitante es la topografía, la letra (t) acompañara a la clase. Si el factor limitante es la capacidad de riesgo de erosión, la letra que acompaña a la clase es (r). Si el elemento limitante es el suelo, la letra adjunta es (l). Por último, si la deficiencia bioclimática es la causa de la limitación la letra (b) será agregada. En el caso de que varios factores limitantes estén presentes a la vez, una celda puede ser designada por una clase y varias subclases, colocadas estas en orden de mayor a menor limitación. Como se puede apreciar en la Tabla 4.

Figura 6 - Ejemplo de combinación de factores Metodología Cervatana Modificada

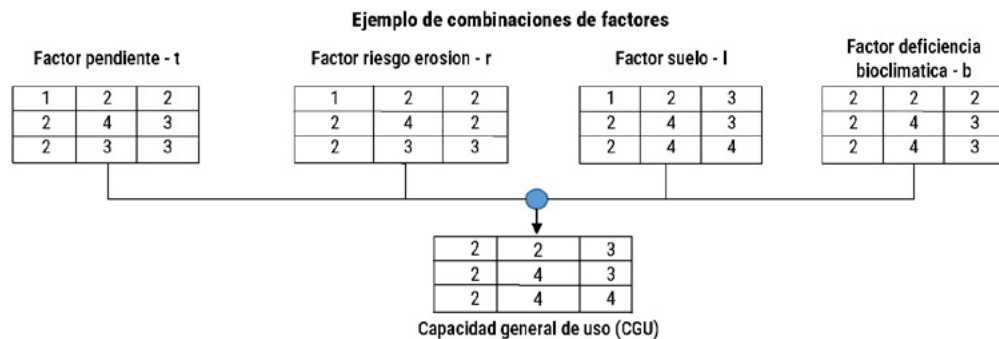


Tabla 4 - Calificación final del Metodología Cervatana Modificada, para los cuatro factores

S1- Aptitud Excelente
S2 - Aptitud Buena
S3 - Aptitud Moderada
N - Capacidad Marginal

Desarrollo de reunión con expertos (metodología Delphi) Otra importante actividad desarrollada en la investigación como un proceso transversal al resto de procesos, fue el aporte de los expertos en el área de suelos y otras especialidades con el fin de mejorar y orientar de una forma más óptima la toma de decisiones en la investigación, se desarrollaron una serie de reuniones con un panel de expertos en diferentes áreas, con el fin de evaluar el grado de adecuación de los UAU y el listado de cultivos más apropiados y adaptables a la región (inventario de cultivos), después del proceso de comparación entre los resultados de las dos metodologías, este listado se convirtió en la base de datos que entra a participar en la fase de recomendaciones generales en cuanto al tema de producción agrícola en su establecimiento teórico productivo en la zona de estudio propuesta en esta investigación.

Como ya se había mencionado en toda esta fase de desarrollo de la investigación se utilizó el Método Delphi (Listone, H. A. y Turoff, M. [eds], 1975). El panel multidisciplinario de expertos del IGAC estuvo conformado por un grupo interdisciplinario de profesionales compuesto por disciplinas como: geografía, geología, agronomía, ingeniería agrícola y agrología.

Como resultados importantes en el trabajo desarrollado con el panel de expertos se tiene la evaluación de las múltiples combinaciones posibles de uso del suelo, convirtiéndose este producto en la estructura de clasificación conformada por una matriz resumida donde la información principal presentada son: las categorías de uso, las diferentes agrupaciones definidas por el método Cervatana modificada y los diferentes usos principales definidos por los expertos, basado en la metodología de levantamientos de suelos, en su tema de clases agrologicas (IGAC, 2011), donde su clasificación es la siguiente: cultivos transitorios intensivos (CTI), cultivos transitorios semi intensivos (CTS), cultivos permanentes intensivos (CPI), cultivos permanentes semintensivos (CPS), pastoreo intensivo (PIN), pastoreo semintensivo (PSI), pastoreo extensivo (PEX), sistema agrosilvopastoriles (ASP), sistema silvopastoril (SPA), sistema forestal productor (FPD), sistema forestal protector (FPR) y áreas para la conservación y/o recuperación de la naturaleza (CRE). El resultado de esta matriz se puede apreciar en la Tabla 5.

Tabla 5 - Matriz homologación entre símbolos las categorías de uso, las diferentes agrupaciones definidas por el Método Cervatana Modificada y los diferentes usos principales definidos por los expertos

Categorías	Capacidad de uso Método Cervatana Modificada	Usos principales del suelo
Usos compatibles	S1	CPI
	S2, S3	CPI, CTI o CTS
	S3 (l)	CTS, CPI o CPS
	S3 (l y/o b)	PIN, PEX, AGS, ASP o SPA

Categorías	Capacidad de uso Método Cervatana Modificada	Usos principales del suelo
Usos compatibles con aplicación de ciertas prácticas de conservación	S2 y/o S3 (t y/o r)	AGS, ASP, SPA, FPR
Usos moderadamente incompatibles	S3 (l)	CPS, AGS o FPD
	S3 (b)	AGS o FPD
	N	AGS, FPD o FPR
Áreas de usos altamente incompatibles	N	AGS
Áreas degradadas a restaurar	N	CRE o FPR
Áreas no evaluadas		Áreas urbanas y zonas rocosas

Fuente: esta tabla es resultado de la reunión con expertos Metodología Delphi.

También, otro producto muy importante resultado de las reuniones y análisis de la información obtenida en las reuniones con los expertos bajo la Metodología Delphi, fue la selección y recomendación de los cultivos más óptimos con el fin de evaluar y recomendar en las áreas de aptitud de uso del suelo resultado del proceso de comparación entre las dos metodologías. A continuación, se presentan el grupo de cultivos seleccionados, agrupados por usos principales basados en la metodología de levantamiento de suelos para clases agrologicas (IGAC, 2011). Ver Tabla 6.

Tabla 6 - Cultivos recomendados por expertos

Usos principales del suelo	Cultivos recomendados expertos
CTS	Soya, caupi, maní, mani forrajero, sachá inchi y yuca arroz de secano, maíz, sorgo dulce, caña de azúcar, soya, piña, mani forrajero, cítricos, plátano, yuca, maní, toronja, naranja tanguelo, mandarina y lima jafroa.
CPI	Caucho, palma de aceite, pasto toledo CIAT 26110 (Brizantha Toledo), pasto amargo (Brachiaria decumbens), pasto dulce (Brachiaria humidicola) y el pasto llanero (Brachiaria dystoneura), mango y marañón.
PEX	Pastos paja peluda o pasto saeta (Trachypogon vestitus)
FPD, FPR	Acacia (Acacia mangium Wild), Eucalipto (Eucalyptus grandis. var. pellita), Pino (Pinus caribaea var. hondurensis)

Posteriormente a la creación del inventario de cultivos recomendada por los expertos, se establecieron los criterios base en la determinación de los cultivos más aptos de acuerdo a los resultados más óptimos de cada UAU determinada para la producción agrícola en el marco de la sostenibilidad ambiental del territorio. Básicamente el criterio principal definido para el desarrollo del análisis de asignación de cultivos más aptos para las UAU más optimas de acuerdo al resultado de comparación entre las dos metodologías, fue establecer el punto óptimo entre el cruce de la oferta edafoclimática, representado en las características de las unidades de aptitud de uso más optimas y los requerimientos edafoclimáticos de los cultivos, información consignada en la ficha técnica de cada uno de ellos.

Proceso de comparación entre los resultados de las dos metodologías

Previamente al desarrollo del proceso de comparación entre las dos metodologías. Se realizó una intersección espacial entre las capas de: limitantes para la producción agrícola, obtenido del análisis y procesamiento de la información del estudio de suelos, específicamente de sus unidades cartográficas, memorias técni-

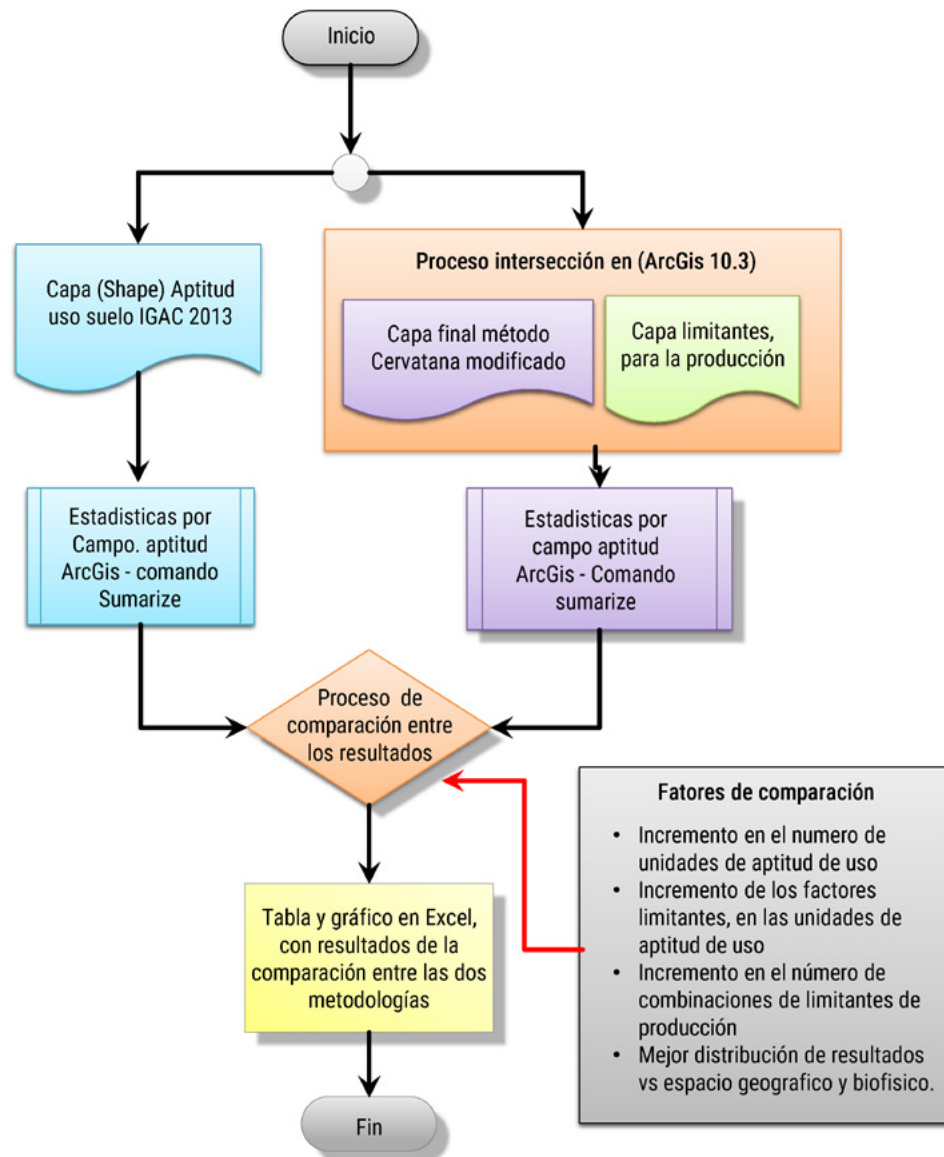
cas y de sus perfiles, que hacen parte del estudio de suelos (IGAC, 2013a) y el mapa resultado de la aplicación de la metodología AM (cualitativa) para los cuatro factores finales: pendiente, riesgo de erosión, suelo y deficiencia bioclimática.

Obtenidas las dos capas de información, insumos necesarios para el desarrollo del proceso de comparación, se procedió a realizar una comparación sistemática (tabulación cruzada) utilizando el

software ArcGis (10.3) y el Excel (versión 2013), como herramientas principales para el desarrollo de este proceso.

El diagrama de flujo presentando en la Figura 7 muestra la síntesis del proceso de comparación y los criterios que se tuvieron en cuenta para definir cuál de los dos métodos es el considerado como más óptimo y más adecuado para recomendar teóricamente, en la definición de aptitud de uso agrícola óptimo con principios de sostenibilidad.

Figura 7 - Esquema del proceso de comparación entre resultados



Resultados

Mapa de aptitud de uso, rasterización y codificado de acuerdo a la MCM

Este insumo se consolido como el primer producto cartográfico para la ejecución del proceso de comparación entre las dos metodologías. En la Figura 8 se puede observar el mapa resultado, en la Figura 9 y la Tabla 7 sus estadísticas se muestran los resultados en porcentajes por calificación de uso codificada de acuerdo a MCM.

Tabla 7 - Resultados de área, porcentaje y calificación de aptitud de uso IGAC 2013, información reclasificada y homologada con codificación MCM

Ocupación de uso	Área (ha)	Porcentaje (%)	Aptitud
s2l	316.161,40	71,28	Aptitud media - limitación por suelo
s2t	1.668,98	0,38	Aptitud media - limitación por topografía
s3l	45.911,52	10,35	Aptitud baja - limitación por suelo
s3t	9.042,93	2,04	Aptitud baja - limitación por topografía
N	70.775,85	15,96	Aptitud marginal
Total	443.560,6	100,00	

Figura 8 - Mapa de aptitud de uso IGAC 2013, homologado a códigos limitaciones MCM

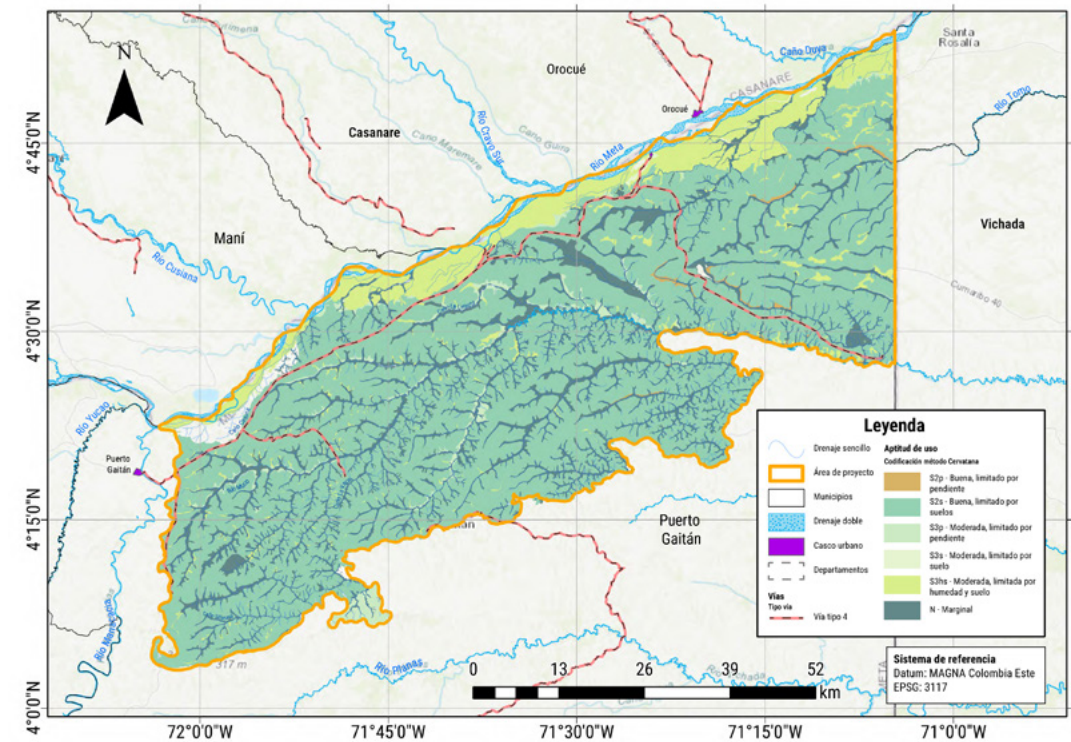
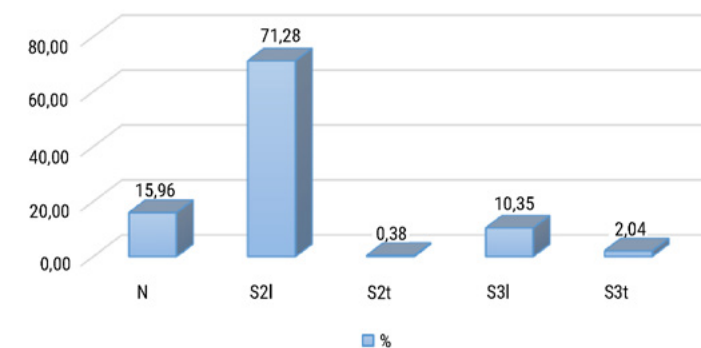


Figura 9 - Gráfico aptitud de uso (homologación), porcentajes (%)



El trabajo desarrollado por el IGAC en el 2013 presentó los siguientes resultados: se tiene que el orden con mayor porcentaje en área, dentro de la clasificación fue la S2 (aptitud buena), con un porcentaje de 71,66% con respecto al área total; siguiéndole en orden de mayor a menor n (capacidad marginal), con un porcentaje 15,96% con respecto al área total, y, finalmente, se tiene la orden S3 (aptitud moderada), con un porcentaje de 12,39% con respecto al área total de proyecto que corresponde a 443560,69 ha. También, es importante destacar que se identificó un solo un factor limitante por unidad de aptitud de uso y estas fueron: limitaciones por suelo

y limitantes por topografía, respectivamente para las unidades S2 y S3. Este resultado resulta muy importante, porque se convierte en un valor cuantitativo, para efectos del análisis en la investigación.

Resultados proceso final Método Cervatana Modificada

A continuación, se presentan el mapa, gráficos y estadísticas del proceso final Metodología Cervatana Modificada. En la Figura 10 se presenta su mapa y en la Figura 11 el gráfico, mostrando sus resultados por porcentaje. Y en la Tabla 8 sus correspondientes estadísticas organizadas por UAU.

Figura 10 - Mapa resultado MCM

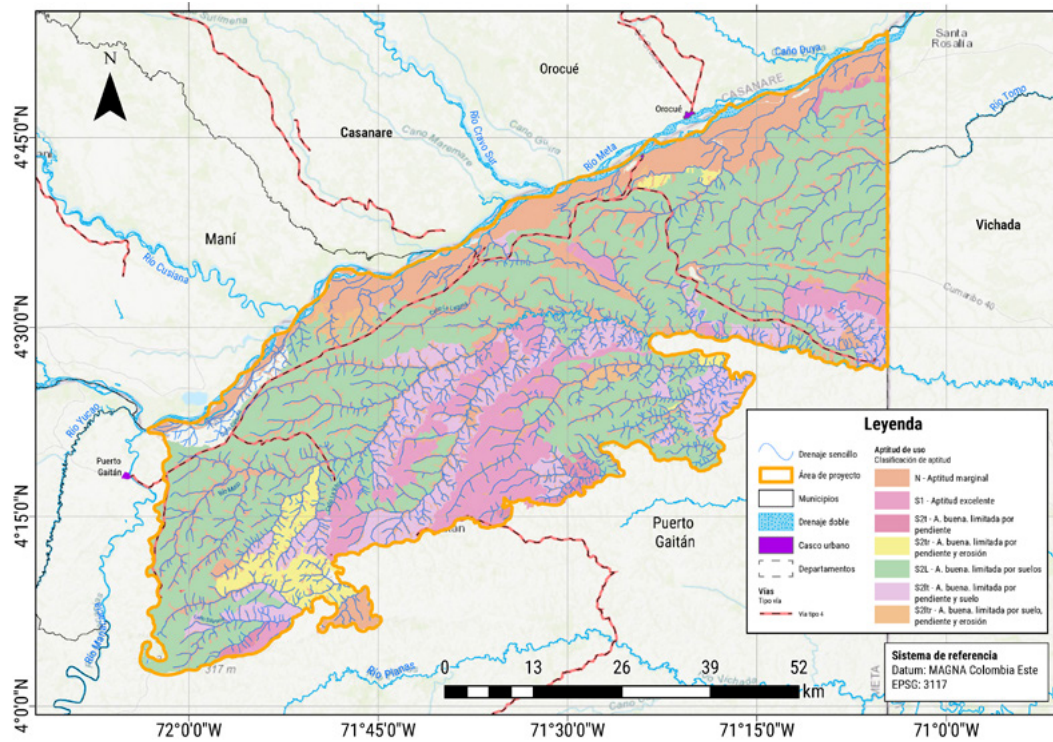


Figura 11 - Gráfico de aptitud de uso Método Cervatana Modificada, en porcentajes (%)

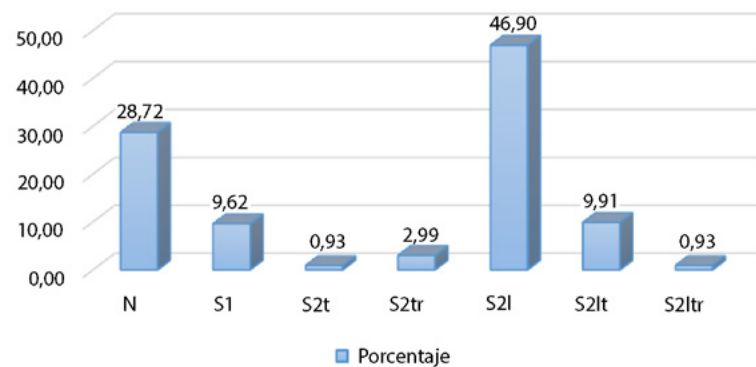


Tabla 8 - Resultados de área (ha), porcentaje (%) y calificación de aptitud de uso Metodología Cervatana modificada

Símbolo aptitud de uso	Área (ha)	Porcentaje (%)	Ocupación del suelo Aptitud - alta
S1	42.656,60	9,62	Aptitud - media (Limitación por nutrientes)
S2t	4.123,08	0,93	Aptitud - media (Limitación por pendiente y erosión)
S2tr	13.272,92	2,99	Aptitud - media (Limitaciones por pendiente)
S2l	208.019,40	46,90	Aptitud - media (Limitaciones por pendiente)
S2lt	43.945,36	9,91	Aptitud - media (Limitaciones nutrientes y por pendiente)
S2ltr	4.144,61	0,93	Aptitud - media (Limitaciones nutrientes, pendiente y erosión)
N	127.398,72	28,72	Aptitud - marginal
Total	443560,60	100,00	

Los resultados de aptitud de uso de los suelos arrojados por la MCM encontraron siete UAU, que corresponden a las siguientes presentadas en un orden de mayor a menor de área en hectáreas, estas son: S2l, N, S2lt, S1, S2tr, S2ltr y S2l. Se obtuvo como máxima calificación la unidad S2l que esta denominada como, aptitud-media, con limitaciones por aspectos de pendiente, esta unidad tiene un área de 208.019,40 ha, equivalente a un 46,90% con respecto al total del área de estudio, continua la unidad S2l que esta denominada como, aptitud marginal, lo especial de esta unidad es que la denominación de aptitud marginal es para las actividades productivas, pero tienen un gran potencial para actividades agroforestales, agrosilvícolas, bosques productores o bosques protectores.

Otro aspecto importante de los resultados arrojados por el MCM, es lo relacionado con su codificación en sus órdenes. De acuerdo a De la Rosa et al., (2009), se resalta que se obtuvieron tres órdenes de aptitud (S1, S2, N), que concuerda con la misma

cantidad con respecto a los arrojados por el IGAC (2013b), la gran diferencia radica en que se mejoró la aptitud del uso del suelo en términos de calidad productiva con la unidad S1, ya que se tiene un área importante de 42.656,60 ha equivalente al 9,62% del área total, en suelos con posibilidad de implementar cultivos transitorios y permanentes de gran valor económico.

Se tiene que para el orden de aptitud de uso N (capacidad marginal), con un área totalizada de este grupo de 127398,72 ha, equivalente a 28,72% con respecto al total del área de estudio. Estos resultados indican que, aunque el porcentaje mayor obtenido fue para S2 (aptitud buena), con un 61,66%, este tipo de aptitud de uso del suelo no es la más óptima dentro de los parámetros de la metodología adoptada en la investigación para el desarrollo productivo, tiene una amplia gama teórica de posibilidades en la implementación de escenarios productivos en el ámbito agrícola. Por otro lado, también se tiene una superficie importante clasificada como N (capacidad marginal), esta área a pesar de que está descartada para el tema productivo al 100% es una zona muy importante desde el punto de vista de la conservación.

Para el tema de los factores limitantes para la producción, el resultado de la identificación estos factores en el estudio adoptado en la investigación MCM muestra que para los resultados obtenidos se encontraron cinco grupos de limitantes de producción o en combinación entre los mismos, estos fueron: limitación por nutrientes, limitación por pendiente, limitación por pendiente y erosión, limitaciones por nutrientes y por pendiente y finalmente, limitaciones por nutrientes, pendiente y erosión.

Resultados de comparación entre las dos metodologías

A continuación, se presentan los gráficos y tablas de la comparación entre los resultados para las dos metodologías (Figura 12, Tabla 9). También, se muestra el número de unidades de aptitud de uso del suelo, obtenidos en cada metodología.

Figura 10 - Gráfico comparativo entre las dos metodologías, en porcentaje (%)

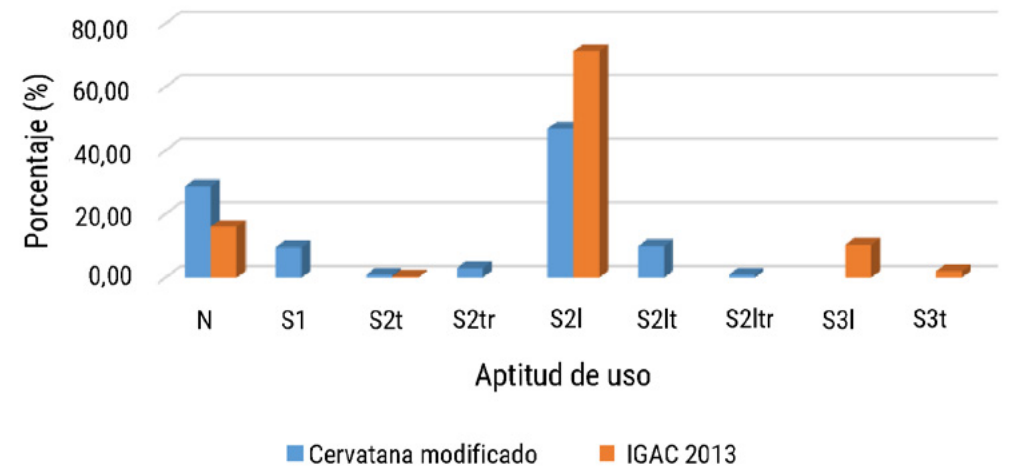


Tabla 9 - Número de unidades de aptitud de uso del suelo, obtenidos en cada metodología

Aptitud de uso		Metodología Cervatana Modificada	
S2	S2l	S2	S1
	S2t		S2tr
S3	S3l		S2t
	S3t		S2lt
N	N	N	S2tr
			N
Total	5	Total	7

Fuente: elaboración propia a partir de los datos del IGAC, 2013a

En la Tabla 10 se presenta la comparación entre áreas en (ha) para las dos metodologías, pero en estas se tomó como información de referencia la MCM, en razón que tuvo mayor número de clases de aptitud de uso, como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 10 - Cuadro comparativo (áreas) de resultados de las dos metodologías con referencia al método implementado en la investigación (más óptimo)

Símbolo	Aptitud de uso (ha)	Ocupación de uso (metodología implementada) (ha)	Diferencia con respecto a metodología de investigación (ha)	Descripción
S1	N/A	42.656,6	(+) 42.656,6	Aptitud alta
S2l	316.161,40	4.123,08	(-) 312.038,32	Aptitud media (limitación por nutrientes).
S2tr	N/A	13.272,92	(+) 13.272,92	Aptitud media (limitación por pendiente y erosión).
S2t	1.668,98	208.019,4	(+) 206.350,42	Aptitud media (limitaciones por pendientes).
S2lt	N/A	43.945,36	(+) 43.945,36	Aptitud media (limitaciones nutrientes y por pendiente)
S2ltr	N/A	4.144,61	(+) 4.144,61	Aptitud media (limitaciones nutrientes, pendiente y erosión).
S3l	45.911,52	N/A	N/A	Aptitud baja (limitación por suelo).
S3t	9.042,93	N/A	N/A	Aptitud baja (limitación por topografía).
N	702.775,85	127.398,72	(-) 575.377,13	Aptitud marginal
Total	443.560,6	443.560,6		

Fuente: elaboración propia a partir de los datos del IGAC, 2013a y De la Rosa et al., 2009

Resultados de los cultivos más óptimos por UAU, basado en los resultados más óptimos del proceso de comparación

A continuación, se presenta los resultados del resumen de cultivos por z (Tabla 11).

Tabla 11 - Resumen de resultados de cultivos por UAU, más óptimos de acuerdo al proceso de comparación

Resultado UAU más óptimo (Símbolo)	Usos principales del suelo	Cultivos recomendados por expertos
S1	CPI	Caucho, palma de aceite, pasto toledo CIAT 26110 (Brizantha Toledo), pasto amargo (Brachiaria decumbens), pasto dulce (Brachiaria humidicola) y el pasto llanero (Brachiaria dyctoneura)
S2l	CTS	Soya, caupi, maní, maní forrajero, sacha inchi y yuca
S2tr	CTS	Arroz de secano, maíz, sorgo dulce, caña de azúcar, soya, piña, maní forrajero, cítricos, plátano.
S2t	CPI	Mango y marañón

Resultado UAU más óptimo (Símbolo)	Usos principales del suelo	Cultivos recomendados por expertos
S2lt	PEX	Pastos paja peluda o pasto saeta (Trachypogon vestitus)
S2ltr	CTS	Yuca, maní, toronja, naranja tangelo, mandarina y lima
S3l	CTS	Jafroa
S3t	CTS	Jafroa
N	FPD, FPR	Acacia (Acacia mangium Wild), Eucalipto (Eucaliptus grandis var. pellita), Pino (Pinus caribea var. hondurensis)

Análisis y discusión

Al evaluar el número de unidades y las áreas obtenidas en hectáreas de aptitud de uso del suelo, modificado y homologado en sus resultados de codificación con respecto al Modelo Cervatana Modificado, modelo implementado en esta investigación, se encontró que el estudio del IGAC (2013b) generó cinco clases que corresponden a las siguientes: S2l, S2t, S3l, S3t y N.

En comparación, al realizar el análisis de los resultados de aptitud de uso de los suelos arrojados por la MCM desarrollada en esta investigación, se encontraron siete UAU, correspondiendo a las siguientes presentadas en un orden de mayor a menor de área en hectáreas, estas son: S2l, N, S2t, S1, S2tr, S2ltr y S2. De entre estas, la máxima calificación la obtuvo la unidad S2l que está denominada como aptitud media, con limitaciones por aspectos de pendiente, esta unidad tiene un área de 208.019,40 ha, equivalente a un 46,90% con respecto al total del área de estudio, continua la unidad N que esta denominada como aptitud marginal, lo especial de esta unidad es que la denominación de aptitud marginal, es para las actividades productivas, pero tienen un gran potencial para actividades agroforestales, agrosilvícolas, bosques productores o bosques protectores.

Otro aspecto importante del análisis de la información arrojada por el MCM, es el relacionado con su codificación en sus órdenes de acuerdo a De la Rosa et al., (2009), se resalta que se obtuvieron tres órdenes de aptitud (S1, S2, N), que concuerda con la misma cantidad con respecto a los arrojados por el IGAC (2013b), la gran diferencia radica en que se mejoró la aptitud del uso del suelo en términos de calidad productiva con la unidad S1, ya que se tiene un área importante de 42.656,6 ha equivalente al 9,62% del área total, en suelos con posibilidad de implementar cultivos transitorios y permanentes de gran valor económico.

Por otro lado, también se tiene una superficie importante clasificada como N (capacidad marginal), esta área a pesar de que está descartada para el tema productivo es una zona muy importante desde el punto de vista de la conservación y se configura en las zonas más adecuadas para el establecimiento de arreglos del tipo agroforestal, agrosilvícola, zonas de protectoras forestales, zonas productoras forestales o de conservación, para la recomendación de este tipo de actividades productivas, se cuenta con un área potencial de 28,72%, en relación con el área total de proyecto. Por último, se tiene una clasificación por orden de S1 (aptitud excelente), esta unidad de aptitud de uso del suelo, teóricamente tiene las mejores características para la producción agrícola, de acuerdo a los resultados se tiene un 9,62% del total del área de proyecto, configurándose en las zonas más importantes resultado de la modelación mediante la MCM.

Para el tema de los factores limitantes para la producción, el resultado de la identificación estos factores en el estudio adoptado en la investigación MCM, muestra que para los resultados obtenidos se encontraron cinco grupos de limitantes de producción o en combinación entre los mismos, estos fueron: limitación por nutrientes, limitación por pendiente, limitación por pendiente y erosión, limitaciones por nutrientes y por pendiente y finalmente, limitaciones por nutrientes, pendiente y erosión.

Apoyado en los análisis y argumentos presentados a lo largo de este artículo, se exponen los principales argumentos los cuales determinaron la definición de los resultados de MCM como la mejor opción productiva en actividades agrícolas. Como primer argumento se tiene el incremento del 28,57% en el número de clases o unidades de aptitud de uso del suelo, pasando de cinco a siete UAU, en esta primera determinación se puede comprobar la primera hipótesis definida para la investigación, la cual planteaba un incremento entre 30% y 50%, del número de unidades de aptitud de uso del suelo, aunque no se llegó al 30% como valor mínimo de la hipótesis, se estuvo muy cerca solo faltando un 1,43%, determinando que las proyecciones de la hipótesis estuvieron muy acertadas. Otro aspecto muy importante encontrado que sustenta la definición de la MCM como la más óptima, es que los resultados de esta metodología, incorporo la unidad de aptitud de uso S1 (aptitud excelente), esto implica que se elevó el nivel de clasificación en el nivel de orden de clasificación según De la Rosa et al., (2009), al primer orden, esta representa según estos resultados un área de 42.956,11 ha, equivalentes al 9,62% del área total de proyecto, estableciendo zonas con menores limitaciones para la producción agrícola, definiendo en estas zonas para el establecimiento de cultivos permanentes y transitorios de carácter intensivo y semi intensivo de un alto valor comercial (Organización de las Naciones Unidas [ONU] 2020).

Además, se presentó un incremento en área para la unidad N (capacidad marginal), con relación a los resultados arrojados por el trabajo desarrollado por el IGAC (2013b), también es un aspecto positivo para efectos de los objetivos de esta investigación, ya que se establecen áreas adicionales de 56598,43 ha. Como ya se había mencionado, estas áreas son las más aptas para el establecimiento de cultivos o arreglos: agroforestales, agrosilvícolas, etc., que fomenten la protección y conservación en el entorno general de la zona de estudio, ya que estas representan la conservación de las fuentes hídricas y a su vez son las proveedoras del recurso agua, muy fundamental para poder desarrollar los procesos productivos.

Esta situación indica de una forma implícita la eficacia en la utilización del Análisis Multicriterio dentro del desarrollo de la investigación en la definición final de los escenarios productivos óptimos, por lo cual se puede inferir, como las nueve variables biofísicas que es utilizaron en el desarrollo del proceso fueron compensadas adecuadamente en la conformación final de la capa geográfica y los resultados anexos de aptitud de uso de los suelos, y donde de acuerdo a Buzai (2007), se confirma la utilidad del Análisis Multicriterio en los procesos de planificación del uso del suelo.

Al analizar la segunda hipótesis de trabajo de la investigación, donde se había planteado que las características de los suelos se iban a constituir como la principal limitante de la producción, esta no se cumplió, encontrándose solo del 11,77%, equivalentes a 52.207,09 ha, con relación al área total de proyecto. En cambio,

el factor más limitante resultó ser la pendiente en la unidad S2t (aptitud media - limitación por pendiente), con un área de 208.019,4 ha, que corresponde a un 46,90%.

Para la unidad N (capacidad marginal), estas áreas son las más aptas para el establecimiento de cultivos o arreglos: agroforestales, agrosilvícolas y protectoras productoras, que fomenten la protección y conservación de estas zonas, ya que estas representan las fuentes hídricas y las proveedoras del recurso agua, el cual es fundamental para poder desarrollar los procesos productivos. Dentro del inventario de cultivos establecido dentro de la investigación se encuentran las especies acacia (Acacia mangium Wild), eucalipto (Eucaliptus grandis var. pellita), Pino (Pinus caribea var. hondurensis).

Conclusiones

Se puede concluir que los resultados del MCM, método adoptado en la investigación para la evaluación de aptitud de uso del suelo en comparación con los resultados obtenidos por el estudio de aptitud de uso del suelo desarrollado por el IGAC en 2013, resultaron ser más óptimos de acuerdo a los cuatro factores de comparación establecidos en la investigación, donde se destacan el incremento de UAU de cinco a siete, esto representa un aumento de 28,57%, con relación a los resultados obtenidos por el estudio del IGAC (2013b), lo que en términos prácticos representa un escenario con una mayor variabilidad para posibles propuestas en cuanto a procesos productivos. Otro elemento muy importante es la aparición de la unidad de aptitud de uso del suelo S1 (aptitud alta) en los resultados finales de la MCM, estas unidades se caracterizan por no presentar o tener muy pocas limitaciones para el desarrollo en usos agropecuarios y especialmente en el tema agrícola.

Finalmente se puede concluir que la utilización de información geográfica a escalas entre 1:25.000 a 1:50.000, el apoyo del uso de los SIG en el procesamiento y análisis de la información geográfica, la utilización de la metodología matemática del análisis multicriterio y la participación de expertos (método Delphi) en la definición de aspectos claves de la investigación, en la definición final de la cartografía y sus unidades de aptitud de uso correspondientes, obtenidas a través de la implementación y desarrollo del Metodología Cervatana Modificado, genero una mayor diversidad y precisión en sus resultados y por ende una mejora muy significativa en la propuesta de clasificación de la aptitud del uso del suelo y en su correspondiente propuesta productiva.

Referencias

Buzai, G. D. (2007). Áreas de potencial conflicto entre usos del suelo: identificación mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica. *Frontiers*, 6(6): 45-49.

De la Rosa, D., Moreno, J. A. y García, L. V. (1992). MicroLEIS: A Micro-computer-based Mediterranean Land Evaluation Information System. *Soil Use and Management*, 8(2), 89-96. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.1992.tb00900.x>

De la Rosa, D., Anaya-Romero, M., Díaz - Pereira, E. Heredia, N y Shahbazi, F. (2009). Soil Specific Agro Ecological Strategies for Sustainable Land Use. A Case Study by

Using MicroLEIS DSS in Sevilla Province, (Spain). *Land Use Policy*, 26(4), 1055-1065. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2009.01.004>

Eastman, J. R. (2000). Decisión Strategies in GIS. *Directions Magazine*. <http://www.directionsmag.com>.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2011). *Zonificación de los suelos por grado de erosión*. Escala 1:50.000. Bogota.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2011). *Metodología para levantamientos de suelos*. Bogotá: Instituto Geografico Agustin Codazzi.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2013a). *Documento soporte Estudio semidetallado de suelos*. Bogotá, Colombia: En edicion.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2013b). *Evaluación de aptitud de tierras*. Bogotá: Sin publicar.

Intergraph. (1994). MGE Terrain Analyst. *User's guide for the Windows NT Operating System*. Huntsville, AL.

Listone, H. A. y Turoff, M. (eds). (1975). *The Delphi Method. Techniques and Applications*. New York: Reading, Addison - Wesley.

Organización de las Naciones Unidas. (2020). *Agenda 2030. Agenda para el desarrollo sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (1985). *Land Evaluation for Forestry*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura .

Paulet, L. (1973). *Guía para el planeamiento del uso de las tierras agrícolas en las zonas de lluvias del Peru*. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina.

Ramos-Reyes, R., Sánchez-Hernández, R. y Gama-Campillo, L. M. (2016). Análisis de cambios de uso del suelo en el municipio costero de Comalcalco, Tabasco, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 3(8), 151-160. <https://doi.org/10.19136/era.a3n8746>

Thorntwaite, C. W. 1948. An Approach Toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38(1), 55-94. <https://doi.org/10.1097/00010694-194807000-00007>



Zonificación agroecológica para el cultivo de café (*Coffea arabica* L) en el departamento de Santander mediante el método multicriterio en QGIS

Agroecological Zoning for Coffee crop (*Coffea arabica* L) in the Department of Santander Using the Multicriteria Method in QGIS

Laura Alejandra Agudelo Mayorga¹ 
 Tatiana Santos Bohórquez² 

Resumen

Este artículo tiene como objetivo delimitar zonas para el cultivo de café (*Coffea arabica* L) en la zona sureste del departamento de Santander utilizando la metodología de multicriterio AHP, esto con el propósito de hallar nuevas formas para la zonificación agroecológica de este producto, dado, que la adaptación de este cultivo cada vez es más problemática debido a la variabilidad climática y fenómenos extremos como el Niño o la Niña. Se consideraron criterios como condiciones climáticas, disponibilidad de nutrientes en el suelo, índices espectrales, susceptibilidad fitosanitaria. Se asignaron pesos a cada criterio y se generó un mapa de aptitud mediante QGIS, revelando que la parte central del área de estudio tiene aptitud alta y media para el cultivo de café. El municipio de Páramo se identificó como el más apto, con un 40,58% de área adecuada, seguido por Valle de San Juan, Suaíta y Jordán.

Palabras clave:

análisis multicriterio, aptitud, café, cartografía, producción, variabilidad climática, zonificación agroecológica.

Cómo citar

Agudelo Mayorga, L. A., Santos Bohórquez, T. (2024). Zonificación agroecológica para el cultivo de café (*Coffea arabica* L) en el departamento de Santander mediante el método multicriterio en QGIS. *Análisis Geográficos*, 57(1), 102 - 121.

Abstract

This article aims to delineate zones for coffee growing (*Coffea arabica* L) in the southeastern region of the Santander department using the Analytic Hierarchy Process (AHP) methodology, with the purpose of finding new ways for the agroecological zoning of this product, given that the adaptation of this crop is becoming increasingly problematic due to climatic variability and extreme phenomena such as El Niño or La Niña. Criteria such as climatic conditions, soil nutrient availability, spectral indices, and phytosanitary susceptibility were considered. Weights were assigned to each criterion, and an aptitude map was generated using QGIS, revealing that the central part of the study area has high and medium suitability for coffee growing. The municipality of Páramo was identified as the most suitable, with 40.58% of suitable area, followed by Valle de San Juan, Suaíta, and Jordán.

Keyword:

Multi-criteria analysis, suitability, coffee, mapping, production, climatic variability, agroecological zoning.

Introducción

El café es el tercer producto alimenticio más importante en el mundo, después del trigo y de la azúcar (Osorio et al., 2015). La producción de café emplea alrededor de 125 millones de personas en regiones tropicales y subtropicales de Asia, África y América Latina (Wintgens, 2009). En Colombia, el cultivo de café se introdujo en el siglo XVIII, ha posicionado al país de manera permanente en mercados internacionales desde finales del siglo pasado, convirtiéndose en la columna vertebral del comercio exterior colombiano (Cárdenas Gutiérrez, 2020). Colombia logró este reconocimiento mundial gracias a la producción de café de alta calidad, dada su ubicación geográfica, su oferta agroecológica, las características de sus suelos y toda una historia y tradición en el cultivo del café que hacen de este un referente mundial reconocido y apreciado por millones de consumidores (Henaó Arismendy, 2015).

Al igual que todo cultivo, el café presenta límites de adaptación a las diferentes condiciones climáticas (Rojas, 1987), por lo cual se debe definir zonas aptas para el adecuado desarrollo del mismo. Para esto se usan metodologías como la zonificación agroecológica que es definida como la división de un área en unidades más pequeñas, que tienen similares características relacionadas con su aptitud y potencial de producción (Pérez-Portilla y Geisert-Kientz, 2006). Como resultado de este proceso, se identifican las regiones más favorables para el desarrollo de un cultivo, cuando las condiciones climáticas, edafológicas, fitosanitarias son las adecuadas (Salazar et al., 2015). La utilización combinada de los sistemas de información geográfica (SIG) y las técnicas de evaluación multicriterio se constituyen herramientas útiles para la aplicación en los procesos de evaluación ambiental y territorial (Jiménez y Ocaña, 2014). Este trabajo utiliza la zonificación agroecológica con el objetivo de delimitar regiones con condiciones aptas para la producción de café por el método de multicriterio. Dando pesos a cada uno de los criterios seleccionados de aptitud que fueron clasificados en cuatro categorías (climatológicas, edafológicas, índices espectrales y fitosanitarias) cada una con sus respectivos índices. Además, se pretende clasificar cada indicador y así hallar un AHP para cada categoría y de esta manera lograr la clasificación y zonificación de las áreas de interés.

Estas categorías se establecieron a partir de la literatura revisada, con énfasis en el documento Zonificación de aptitud para el cultivo de café (*Coffea Arabica* L.) escala 1:100.000, en Colombia de la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA, 2021), que se encuentra en proceso de publicación. Los criterios evaluativos establecen que compilan diversa geodata extraída de metadatos de instituciones gubernamentales como Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

Metodología

Después de recopilar los datos, incluidos los registros de diversas estaciones meteorológicas de la zona, se utilizan las herramientas disponibles en QGIS 3.16. Estas herramientas abarcan desde la evaluación de la proximidad hasta la superposición de capas, aplicando filtros y técnicas de interpolación, entre otras funcionalidades. Todo ello con el propósito de generar una zonificación agroecológica óptima para el cultivo del café.

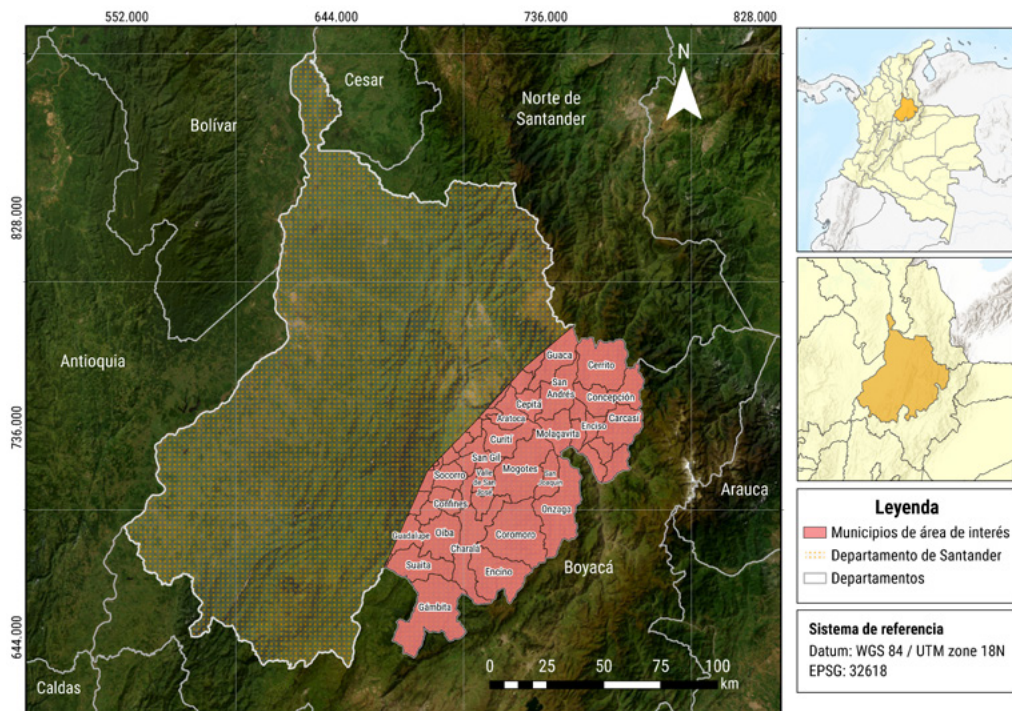
Área de estudio

El área de estudio escogida es el departamento de Santander, esto se debe a que, actualmente el café hace presencia en todos los municipios con aproximadamente 51.840 hectáreas sembradas, cuenta con tecnificación del 99,87%, así mismo, cuenta con variedades resistentes a la roya como Colombia, Castillo y Tabi, con 79% bajo sombra de excelente manejo, convirtiéndose así en una de las caficulturas más jóvenes y productivas del país (Federación Nacional de Cafeteros, 2021). Los municipios con mayor cantidad de hectáreas y producción de café son Socorro, Valle de San José y San Gil, las cuales tienen más del 97,35% de variedades resistentes a roya del café (Arciniegas et al, s.f). Por lo anterior, se escogió una zona cercana a estos municipios como se muestra en la Figura 1, para su análisis y de esta manera delimitar áreas cercanas para el acondicionamiento e implementación del cultivo del café.

¹ Universidad Nacional de Colombia. laaagudeloma@unal.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1844-4119>.

² Universidad Nacional de Colombia. tsantosb@unal.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6337-4892>.

Figura 1 - Área de estudio



Metodología de multicriterio empleada: definición de los criterios

En cuanto a la secuencia de la evaluación multicriterio, se definió su objetivo: generar una capa de información que muestra una zonificación o clasificación del lugar estudiado con una puntuación asignada a cada área o zona del territorio en función de su capacidad, dependiendo de la categoría (Jiménez y Ocaña, 2014).

El Proceso Analítico Jerárquico (AHP) es un método utilizado para tomar decisiones en situaciones complejas y multidimensionales. Fue propuesto por el profesor Thomas L. Saaty en la década de los setenta y se ha aplicado en diversos campos como la empresa, la economía y la investigación de operaciones (Yepes, Proceso Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Process, AHP), 2018) A continuación, se proporciona una explicación del AHP, citando literatura relevante:

1. Estructura jerárquica: en el AHP, se organiza el problema en una estructura jerárquica similar a un árbol familiar. El objetivo final se encuentra en el nivel superior, mientras que los criterios y subcriterios se ubican en niveles inferiores. Es fundamental definir bien los criterios y subcriterios, asegurándose de que estén bien definidos, relevantes y mutuamente excluyentes. (Yepes, Proceso Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Process, AHP), 2018)

2. Comparación por pares: se comparan los criterios y alternativas mediante matrices de comparación pareadas y se utiliza una escala fundamental (por ejemplo, del 1 al 9) para comparar las preferencias entre dos criterios o alternativas. La Ley de Weber-Fechner respalda esta escala logarítmica, que se adapta bien al proceso de comparación. (Yepes, Proceso Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Process, AHP), 2018) (Ruiz, 2019).

3. Cálculo de pesos: se obtiene una matriz de decisión a partir de las comparaciones. Luego, se calcula el auto vector principal (vector de preferencia) utilizando el teorema de Perron-Frobenius. (Yepes, El blog de Victor, 2022) El auto vector representa los pesos relativos de los criterios y alternativas.

4. Índice de consistencia (CI): mide la consistencia de la jerarquía, se calcula como la diferencia entre la suma de los autovalores y el número de criterios, dividida por el número de criterios menos uno, un valor de CI más bajo indica mayor consistencia. (Mendoza, 2019)

5. Radio de consistencia (CR): este criterio ajusta el CI según el tamaño de la matriz, se divide el CI entre un valor de referencia tabulado para el tamaño de la matriz. Si el CR es menor que un valor específico (generalmente 0,1), la jerarquía se considera aceptable en términos de consistencia. (Mendoza, 2019)

En resumen, el AHP permite evaluar la consistencia de las ponderaciones asignadas por los evaluadores, garantizando decisiones confiables y estables. Para más detalles y ejemplos, puedes consultar la literatura citada.

Se han utilizado la herramienta de análisis de decisiones multicriterio (AHP) para priorizar cada característica en la zonificación del cultivo del café para el departamento de Santander. La evaluación se efectúa sobre alternativas existentes, cada una de ellas adquiere un conjunto de características comunes que la diferencian de otra, se consideran cuatro características principales:

1. Climatología: variables continuas en el espacio y variables de ocurrencia.
2. Características edafológicas: disponibilidad de nutrientes y de oxígeno, capacidad de laboreo y aptitud, uso del suelo.

3. Índices espectrales: EVI, NDVI, NDWI, BSI y MSI.
4. Susceptibilidad fitosanitaria: temperatura asociada a la broca del café.

La ejemplificación de cada categoría con sus atributos está en el Anexo 1. Para evaluar cada criterio se ha seleccionada una serie de indicadores basados en la revisión de la literatura, como se observa en la Figura 2.

Climatología

La climatología estudia el estado físico medio de la atmósfera y su variación en el tiempo y espacio (Navara, 2021). Un índice bioclimático tiene aplicación en la determinación de las condiciones que prevalecen antes de un evento fisiológico y permiten evaluar la duración del ciclo vegetativo y productivo del cultivo y su relación con las condiciones genéticas y de manejo (Salazar et al., 2015). Se dividió la climatología en dos grandes grupos: climatología de variables continuas en el espacio y climatología de variables de ocurrencia, cada una con los siguientes indicadores:

Climatología de variables continuas en el espacio

1. **Temperatura media anual:** medida del estado térmico del aire con respecto a su habilidad de comunicar calor a su alrededor; depende principalmente de la latitud y altitud, se toma generalmente como un índice de balance calórico, expresado en grados centígrados (UPRA, 2021). Los rangos térmicos de ubicación del cultivo en Colombia se relacionan con la altitud, estas temperaturas varían de 17°C a 25°C con un rango óptimo entre 19°C y 22°C (Ramírez et al., 2013).
2. **Humedad relativa:** como sucede con todos los productos naturales, la humedad en el café es un elemento importante y decisivo en su calidad final. Esto aplica para todo el ciclo de vida del café, desde que empieza el cultivo hasta su preparación (Puerta Quintero, 2006) La humedad relativa en las zonas productoras de café oscila entre el 70% y el 85%, este factor presenta altas variaciones entre el día y la noche; en el día puede descender hasta 45% y subir en la noche hasta alrededor de 100%.

3. **Evapotranspiración del cultivo:** la determinación del consumo hídrico por las plantas es importante en diversas áreas de la agricultura, tales como los estudios de la demanda y el manejo del riego, saneamiento agrícola, estimación de la producción y estudios hidrológicos en general. La evapotranspiración de cultivo está directamente relacionada a tales estudios y es definida como la cantidad de agua consumida por un determinado cultivo (Cisneros et al., 2015). La evapotranspiración del cultivo en las zonas cafeteras de Colombia varían de 1.100 a 1.500 mm siendo el rango óptimo hasta 1.400 mm (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC], 2003).
4. **Altitud:** la altitud tiene un impacto directo en el tamaño, forma y sabor del café. Los granos más buscados son cultivados en más de 1.300 m.s.n.m., su alta densidad se debe en parte al crecimiento lento que ocurre en un ambiente de gran altura. Por otro lado, a una menor altura los granos tienden a ser menos densos (Molina, 2016).

Posterior al análisis de la matriz de pesos se obtiene la siguiente información:

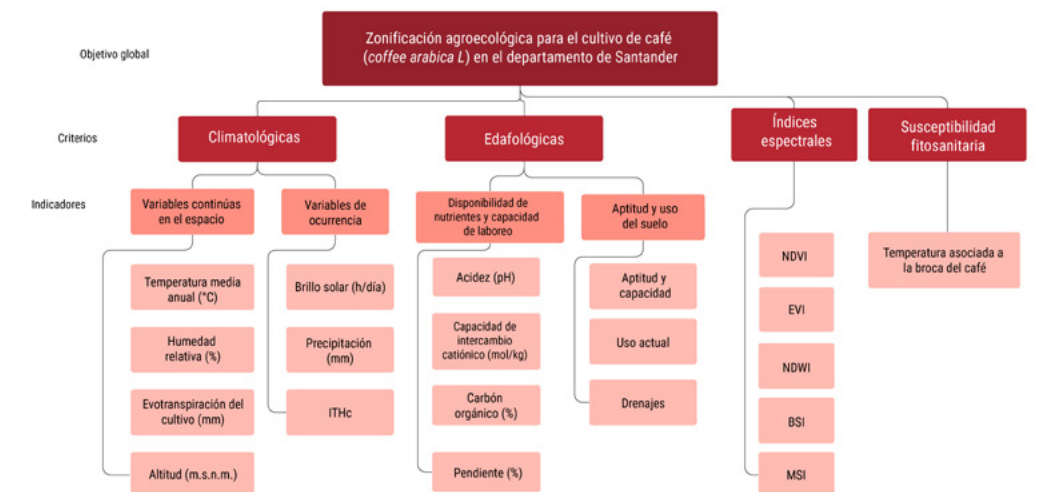
Tabla 1 - Pesos para la climatología continua

Climatología continua	
Temperatura media anual (°C)	27,1%
Altitud	42,3%
Evapotranspiración del cultivo	14,4%
Humedad relativa	16,2%
CI	0,02
CR	2,0%

Climatología de variables ocurrentes

1. **Brillo solar:** es el principal factor que determina el microclima del cultivo; su energía condiciona la temperatura del aire y del suelo, el movimiento del viento, la evapotranspiración y la fotosíntesis, de tal manera que la intensidad de la radiación, el grado de interceptación y la eficiencia en el uso de la energía radiante son determinantes en la tasa de crecimiento de las plantas (Jaramillo et al., 2006). Las condiciones óptimas de brillo solar

Figura 2 - Metodología de multicriterio AHP



para el cultivo están en un rango de 4 a 6 horas al día, menos de 3 horas del sol al día no es recomendable, el abuso de sobre es la causa aparente de los bajos rendimientos (Rojas, 1987).

- Precipitación:** el café se puede producir con dos periodos secos y dos periodos lluviosos al año como en la mayoría de la zona cafetera del país, o en zonas con tendencia a presentar una sola estación lluviosa al año (ICONTEC, 2003). Se requiere una precipitación por encima de 1000 mm/año, con una distribución adecuada según la etapa fisiológica. Los valores críticos por exceso se observan a partir de los 2.800 (Salazar et al. 2015).
- IDHC:** es el índice de la relación mensual adimensional entre la evapotranspiración actual, refiriéndose a la cantidad de agua que suministra la precipitación en dicho mes, que es evapotranspirada y, la evapotranspiración mensual del cultivo de café, siendo un rango óptimo para el cultivo de café de 0,7 a 1,5 (UPRA, 2021).

Posterior al análisis de la matriz de pesos se obtiene la siguiente información:

Tabla 2 - Pesos para la climatología de ocurrencia

Climatología de ocurrencia	
Brillo solar	54,9%
Precipitación	24,1%
ITHC	21,1%
CI	0,01
CR	2,0%

Por medio de la literatura recopilada y para efectos de la zonificación del cultivo del café, se tomaron como referencia rangos y valores para categorizar los diferentes indicadores, en categorías competitivas como: aptitud alta (3), aptitud media (2), aptitud baja (1) y no apta (0), como se observa a continuación:

Tabla 3 - Aptitud para cada índice de la climatología

Categoría	Criterios	Unidad	Aptitud				Datos
			Alta	Media	Baja	No apta	
Climatológica	Variables continuas en el espacio						
	Temperatura media anual	°C	19-22	16-19 y 22-24	24-25	< 16 y > 25	Promedios climatológicos IDEAM
	Humedad relativa	%	70-85%	65-70%	< 65%	> 80%	Promedios climatológicos IDEAM
	Evapotranspiración del cultivo	mm/año	1.400-1.100	1.400-1.500	> 1500	< 1.100	Promedios climatológicos IDEAM
Variables de ocurrencia	Altitud	m.s.n.m.	1300-1700	1700-2000	1000-1300	< 1.000 y > 2.000	DEM Vertex alos pasar
	Brillo solar	h/día	5-6	6-7	< 5	-	Promedios climatológicos IDEAM
	Precipitación	mm/año	> 2.800	1.400-2.800	< 1.400	-	Promedios climatológicos IDEAM
	ITHC	rango	0,7-1,5	1,5-2,0	2,0-2,5	> 2,5 y < 0,7	Promedios climatológicos IDEAM

Edafología

Los suelos dedicados al cultivo del café son de origen variado en el mundo, algunos son derivados de ceniza volcánicas, a menudo laterizados como en Colombia. Estos suelos y los de origen aluvial presentan condiciones excelentes para el cultivo del café, pero este se caracteriza por su gran adaptabilidad respecto a los suelos (Jackson, 1958; Rojas, 1987). En este trabajo se escogió como indicadores: la disponibilidad de nutrientes, la capacidad de laboreo, la aptitud, el uso del suelo y la disponibilidad de oxígeno para el análisis multicriterio, como se presenta a continuación.

Disponibilidad de nutrientes y capacidad de laboreo

- Acidez (pH):** la acidez del cultivo debe estar a nivel pH óptimo, que es entre 5,0 y 5,5 (UPRA, 2021). En este rango la planta tiene mayor capacidad de absorber los nutrientes y esto da como resultado más cerezas de café y menos problemas relacionados con las plagas y enfermedades (Oliveira, 2019).
- Capacidad de intercambio catiónico:** la capacidad de intercambio de cationes y aniones es una de las características más importantes del suelo, independientemente de otras interpretaciones, determina el intercambio de la mayoría de los elementos requeridos para la nutrición vegetal y constituye gran parte de la capacidad reguladora del medio (Cortés y Nalagón, 1984). La capacidad de intercambio catiónico óptima para el cultivo de café es mayor a 19 mol/kg (UPRA, 2021).
- Carbono orgánico:** el carbono orgánico del suelo se deriva de residuos orgánicos de plantas y animales, así como de microorganismos vivos y muertos, presentes en el humus. Algunas formas pueden estar altamente condensadas, casi en forma de carbono elemental (Jackson, 1958). El porcentaje de carbono orgánico óptimo para el cultivo de café es mayor a 3,5.
- Pendiente:** grado de inclinación de una superficie desde la horizontal generalmente expresada en porcentaje o grados (Soil Science Society of America [SSSA], 2018). Se relaciona con las condiciones para desplazamiento de las personas y elementos de trabajo a través del cultivo, la pendiente apta para el cultivo de café debe ser menores a 25% (Ocampo López, 2018).

Posterior al análisis de la matriz de pesos se obtiene la siguiente información:

Tabla 4 - Pesos para la disponibilidad de nutrientes

Disponibilidad de nutrientes	
Acidez (pH)	21,5%
Capacidad de intercambio catiónico	11,0%
Carbono orgánico	26,5%
Pendiente	41,0%
CI	0,05
CR	6,0%

Aptitud, uso del suelo y disponibilidad de oxígeno

- Aptitud:** capacidad de un lugar específico para producir un cultivo determinado en base a los condicionamientos agroclimáticos y de suelos (Salvatore et al., 2010).
- Uso actual:** es la actividad que se desarrolla en un determinado espacio geográfico, en el momento de la elaboración del estudio de zonas homogéneas físicas (Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital [UAECD], 2021).

- Drenaje:** rapidez y grado de remoción de agua del suelo por la escorrentía y el flujo a través del suelo a los espacios subterráneos (United State Department of Agriculture [USDA], 1961).

Posterior al análisis de la matriz de pesos se obtiene la siguiente información:

Tabla 5 - Pesos para aptitud, uso del suelo y disponibilidad de oxígeno

Aptitud, uso del suelo y disponibilidad de oxígeno	
Aptitud	31,0%
Uso Actual	19,8%
Drenajes	49,0%
CI	0,03
CR	5,0%

Por medio de la literatura recopilada y para efectos de la zonificación del cultivo del café, se tomaron como referencia rangos y valores para categorizar los diferentes indicadores, en categorías competitivas como: aptitud alta (3), aptitud media (2), aptitud baja (1) y no apta (0), como se observa a continuación:

Tabla 6 - Aptitud para cada índice de la edafología

Categoría	Criterios	Unidad	Aptitud			
			Alta	Media	Baja	No apta
Edafológicas	Disponibilidad de nutrientes y capacidad de laboreo					
	Acidez (pH)		50-55	55-60	< 50 y > 60	-
	Capacidad de intercambio catiónico	mol/kg	> 19	10-19	< 10	-
	Carbono orgánico	%	> 35	25-35	< 25	-
Aptitud y uso del suelo	Pendiente	Porcentaje	< 25	25-75	> 75	-
	Aptitud	Capas	Cultivos tecnificados de café en suelos profundos y moderadamente profundos para cultivos permanentes.	Aptas para cultivos de ciclo vegetativo corto.	Con adecuadas prácticas de manejo de pastos, ganadería.	Reforestación, bosques protector y otros.
Uso actual	Capas		Sin cobertura y con aptitud agrícola.	Cultivos transitorios	Cultivos permanentes	Bosques o reservas ecológicas o zonas urbanas.

Índices espectrales

La firma espectral es la variación entre la radiación incidente y reflectante en función a la longitud de onda (Los sistemas de observación de la tierra LANDSAT, SPOR y Sentinel entre otros, ofrecen imágenes multitemporales que son usadas ampliamente para evaluar y monitorear el estado de la vegetación, en los niveles

global, regional, nacional y local (Muñoz Aguayo, 2013). Para este artículo se utiliza el satélite Sentinel 2, que provee imágenes multispectrales de alta resolución en órbita polar, se introdujeron los índices de vegetación y suelos para tener una idea de las condiciones del momento actual.

La respuesta espectral en un cultivo se relaciona con la interacción entre la radiación electromagnética y las características relacionadas con la vegetación, como la estructura de la vegetación, el estado fenológico, su densidad y la orientación espacial y efectos de fondo del suelo (Galvão et al., 2005). Los índices de vegetación obtenidos a partir de las imágenes multispectrales fueron escogidos para la implementación del cultivo de café (*Coffea arabica* L) se tuvo en cuenta la frontera agrícola del departamento y las áreas boscosas del mismo. De esta manera se escogieron los siguientes indicadores para esta categoría:

- NDVI:** el índice de vegetación diferencial normalizado, dispone de un rango de variación fijo (ente -1 y +1) lo que permite establecer umbrales y comparar imágenes. Valores muy bajos de NDVI, del orden de 0,1 que corresponden a áreas rocosas, arenosas o nevadas. Valores de 0,2 a 0,3 pueden pertenecer a áreas pobres con arbustos o pasturas naturales (Muñoz, 2013). Los valores negativos representan superficies sin vegetación.
- EVI:** el índice de vegetación mejorado e inventado por Liu y Huete (1995 para corregir simultáneamente los resultados del NDVI cuando hay influencias atmosféricas y respecto a las señales de fondo del suelo, especialmente en zonas con una cubierta vegetal denso. El rango de valores para el EVI es de -1 a +1, y para la vegetación sana varía entre 0,2 y 0,8 (EOS Data Analytics, 2022).
- BSI:** el índice de suelo desnudo Bare Soil Index (BSI) fue diseñado para identificar la diferencia en el comportamiento espectral entre áreas de suelo desnudo y áreas con escasa vegetación (Lamar et al., 2018). Los valores bajos de BSI están asociados a suelos cubiertos con vegetación, agua, entre otras coberturas, mientras que los valores altos significan áreas correspondientes a suelo desnudo (Kumar et al., 2016).
- NDWI:** este índice se utiliza para medir la cantidad de agua que posee la vegetación o el nivel de saturación de humedad que posee el suelo. Los valores que se obtienen oscilan entre -1 y +1, para las zonas con menos humedad (Muñoz Aguayo, 2013).
- MSI:** es un índice de vegetación identificado por las siglas del nombre en inglés Moisture Stress Index. Las aplicaciones de este índice incluyen el análisis del estrés del dosel, la predicción de la productividad y el modelamiento, análisis del estado del riesgo de incendio, y los estudios de la fisiología del ecosistema. Los valores más altos indican un mayor estrés hídrico y por lo tanto un menor contenido de agua. El valor de este índice varía de 0 a más de tres. El intervalo común para la vegetación verde es de 0,4 a 2,0 (Villatoro, 2020).

Posterior al análisis de la matriz de pesos se obtiene la siguiente información:

Tabla 7 - Pesos para los índices espectrales

Índices espectrales	
Indicador	Pesos
EVI	35%
NDVI	27%
BSI	13%

Índices espectrales		
Indicador		Pesos
NDWI		12%
MSI		12%
CI		0,08
CR		7%

Teniendo en cuenta que la utilización de los índices espectrales tiene como objetivo la zonificación de áreas agroecológicas, se toman los valores de la literatura para áreas sin vegetación o con vegetación moderada y suelos desnudos, como se observa a continuación:

Tabla 8 - Aptitud para cada índice de los índices espectrales

Categoría	Criterios	Aptitud				Referencia
		Alta	Media	Baja	No apta	
Índices espectrales	EVI	0,2-0,5	-	0,5-0,8	-1,0 y > 0,8	Imágenes espectrales del Sentinel 2
	NDVI	0,2-0,4	0,41-0,5	0,6-1,0	-1,0	
	BSI	> 0,5	0,4-0,1	-	< 0,1	
	NDWI	-0,5	0,5-0,6	0,7-0,8	> 0,8,5	
	MSI	0,4-0	1,0-0,2	2-0,3	> 3,0	

Fitosanitario

Condiciones que explican la aparición, desarrollo y propagación de plagas y/o enfermedades que, para el caso del cultivo de café, está referida a la broca del cafeto en Colombia (UPRA, 2021). Por esto se seleccionó el indicador de la temperatura.

1. *Temperatura asociada a la broca del café:* la temperatura determina la biología reproductiva de la broca siendo directamente proporcional a su desarrollo, es decir, a mayor temperatura mayor prole (UPRA, 2021).

Tabla 9 - Aptitud para la temperatura asociada a la broca del café

Categoría	Criterios	Unidad	Aptitud				Referencia	
			Alta	Media	Baja	No apta		
Susceptibilidad fitosanitaria	Temperatura asociada a la broca del café	Temperatura media	°C	< 22	22-24	> 24	-	Promedios climatológicos IDEAM

Resultados y discusión

Al obtener los valores de las diferentes variables, estos fueron subidos a QGIS, donde se hizo una interpolación para cada índice de los criterios, algunos por el método IDW y otros por el método de Kriging. Para la altitud se hizo un modelo digital de elevación (DEM). Luego se hizo una clasificación para cada índice para así poder hacer un AHP para cada criterio y luego obtener un AHP donde se muestran las regiones con aptitudes óptimas para la producción del cultivo de café, para su implementación en el área indicada. A continuación, se muestran los resultados obtenidos en QGIS.

Climatología

Temperatura media anual

La temperatura media anual se interpoló mediante el método de Kriging debido a un RMSE significativamente menor en comparación con la interpolación IDW, lo que indica una precisión superior. La Figura 3a se presenta la interpolación con isotermas y la clasificación para la temperatura media anual. En la interpolación, las zonas con temperaturas más altas, alrededor de 25°C, se representan en rojo, mientras que las más frías, aproximadamente 12°C, en azul. En la clasificación, como se observa en la Figura 5a las zonas aptas se identifican con un valor de 3 en verde, y las de baja aptitud con un valor de 1 en rojo, indicando una predominancia de regiones con aptitud alta y media en comparación con aquellas de aptitud baja y no apta.

Humedad relativa y evapotranspiración del cultivo

Se utilizó la interpolación de IDW en lugar de Kriging para la humedad relativa y la evapotranspiración debido a un RMSE similar, como se muestra en la Figura 3c de los resultados en QGIS. Las áreas con humedad relativa superior al 78% se representan en azul oscuro, mientras que las zonas con humedad inferior al 68% varían en tonalidades de azul menos intenso hasta blanco, indicando predominantemente altos niveles de humedad en el área de interés. La Figura 5c de clasificación resalta en verde las regiones con alta aptitud (3) para el cultivo de café, lo que sugiere que la mayoría de la zona posee una humedad relativa adecuada. En la Figura 4b, la interpolación muestra regiones verdes con mayor evapotranspiración (1.400 mm) y moradas con menor (800 mm), indicando principalmente valores de 1.000 a 1.150 mm en la zona. Como se observa en la Figura 6c la clasificación no permite distinguir claramente entre regiones aptas y no aptas, sin revelar zonas de aptitud media o baja.

Altitud y brillo solar

Para la altitud se realizó un DEM el cual da una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2021). En la Figura 3d, se muestra un DEM en el que las altitudes más bajas, alrededor de 1.000 m.s.n.m., se representan en tonos rosados, mientras que las altitudes más altas, alrededor de 4.000 m.s.n.m., aparecen en rojo oscuro, indicando que el centro del departamento de Santander tiene altitudes más bajas y es apto para el cultivo de café. En su clasificación como se observa en la Figura 5d, encontramos aptitudes medias y altas para la zona occidental del lugar de interés. Para la interpolación del brillo solar, se empleó el método IDW en QGIS. En la Figura 4a, los colores oscuros del mapa representan regiones con aproximadamente cinco horas de luz solar al día, mientras que los colores más claros indican áreas con siete horas de luz solar diarias, como se observa en la Figura 6a sugiere una alta aptitud de radiación solar para el cultivo de café en la mayoría de la zona de interés.

Precipitación e ITHc

Se utilizó el método de Kriging para interpolar la precipitación debido a su menor RMSE en comparación con la temperatura media anual. En la Figura 3b, el azul oscuro representa áreas con alrededor de 3.200 mm de precipitación, mientras que el azul claro o blanco indica aproximadamente 1.400 mm. La mayoría de la zona de interés muestra aptitud media de precipitación en el mapa de

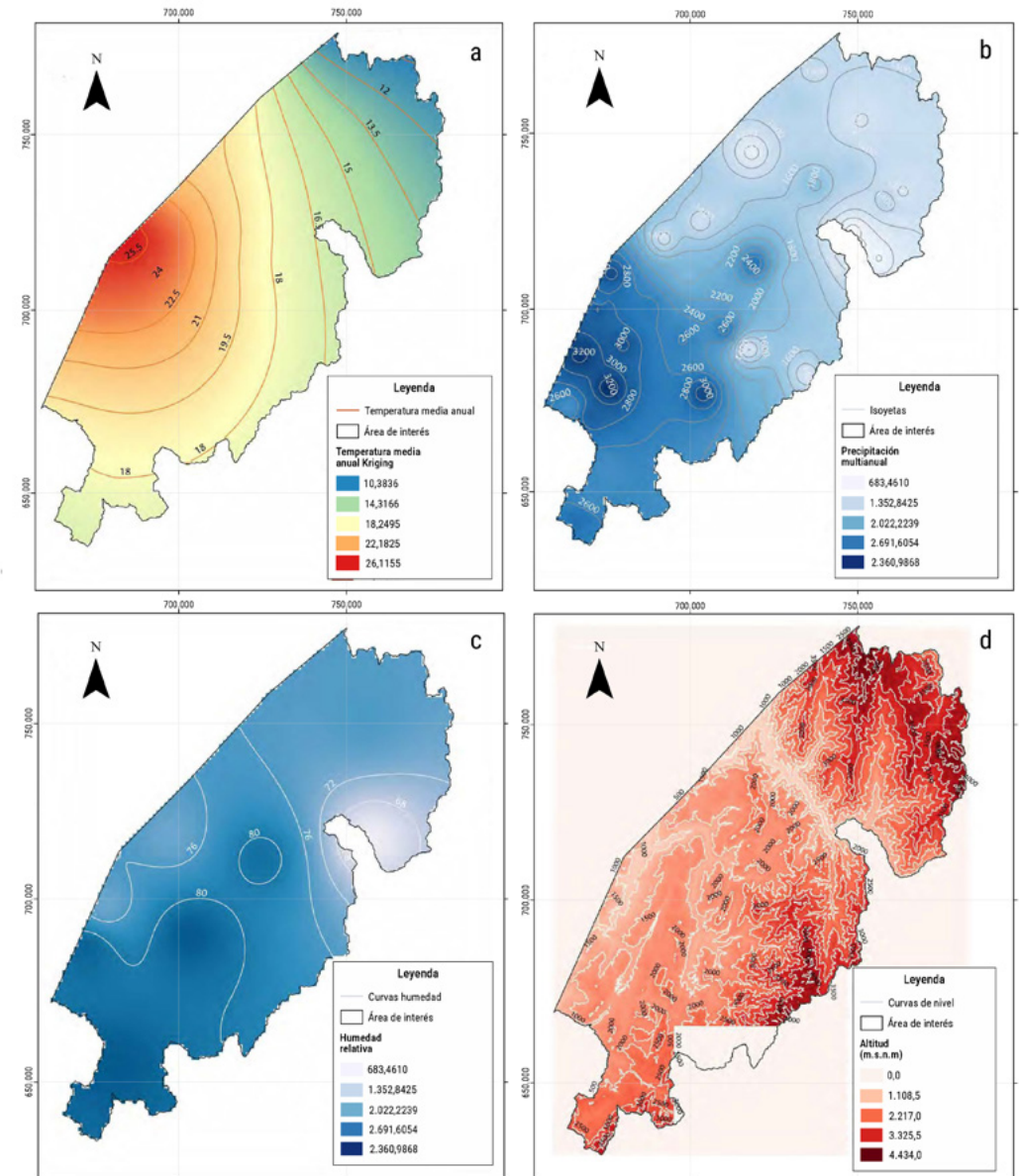
clasificación (véase figura 5b). En la Figura 4c, la interpolación del Índice de la Relación Mensual entre la Evapotranspiración Actual (ITHc) mediante el método IDW muestra valores bajos en colores oscuros y altos en colores claros. La clasificación revela áreas casi iguales de aptitudes alta, media y baja, con una pequeña zona no apta en el sur de la región. (véase figura 6c). El IDHc refleja la relación entre la evapotranspiración actual, relacionada con la precipitación mensual, y la evapotranspiración mensual del cultivo de café.

Fitosanitario

Temperatura asociada a la broca del café

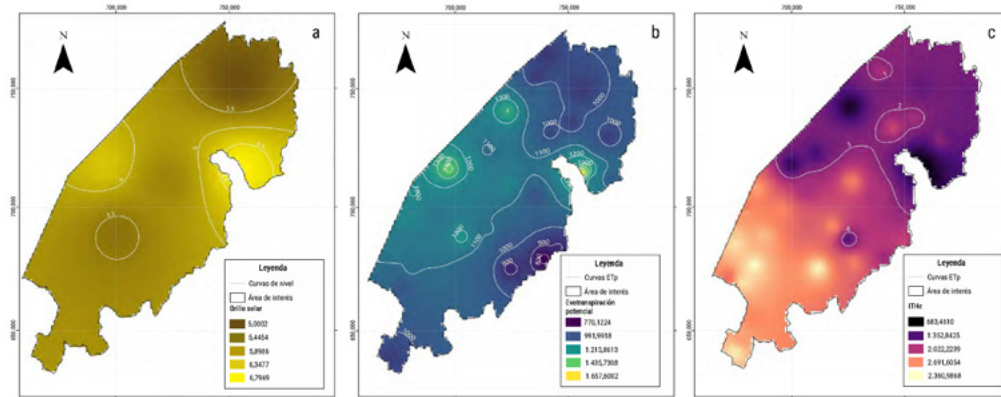
Para la clasificación de la temperatura asociada a la broca del café se tomó la interpolación de la temperatura media anual la cual se muestra en la Figura 6d y a partir de esto se hizo la clasificación para esta temperatura.

Figura 3 - Interpolaciones para las diferentes variables climatológicas



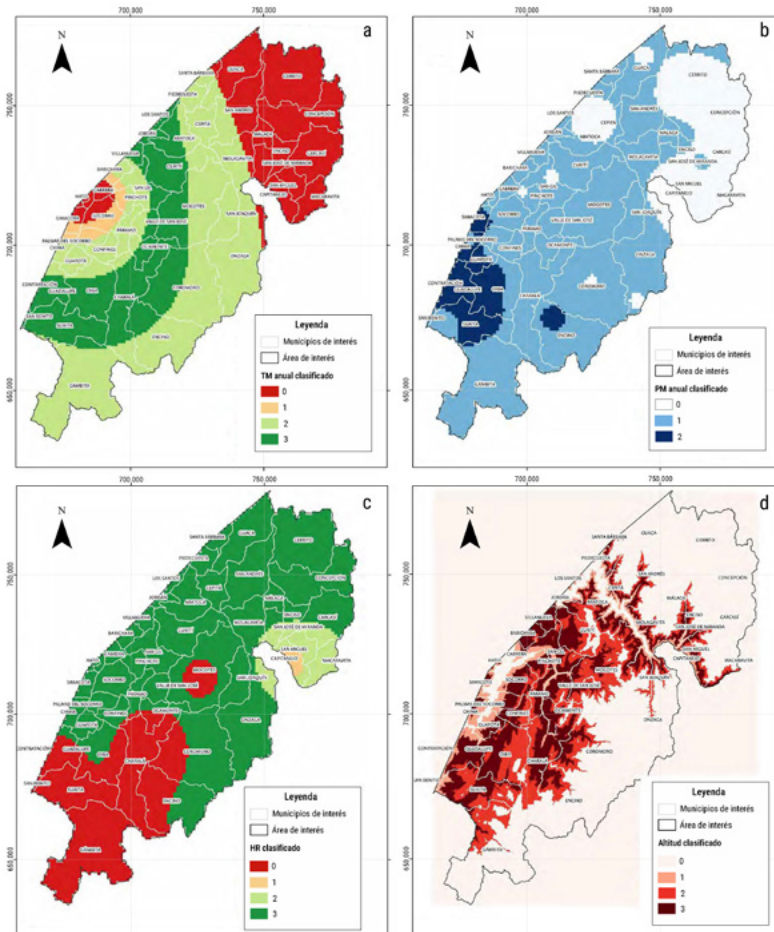
Fuente: IDEAM <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/> y del DEM de Vertex de <https://search.asf.alaska.edu/>
 Nota: a) temperatura media anual (°C) b) precipitación multiannual (mm/año) c) humedad relativa (%) d) altitud (m.s.n.m.)

Figura 4 - Interpolaciones para las diferentes variables climatológicas



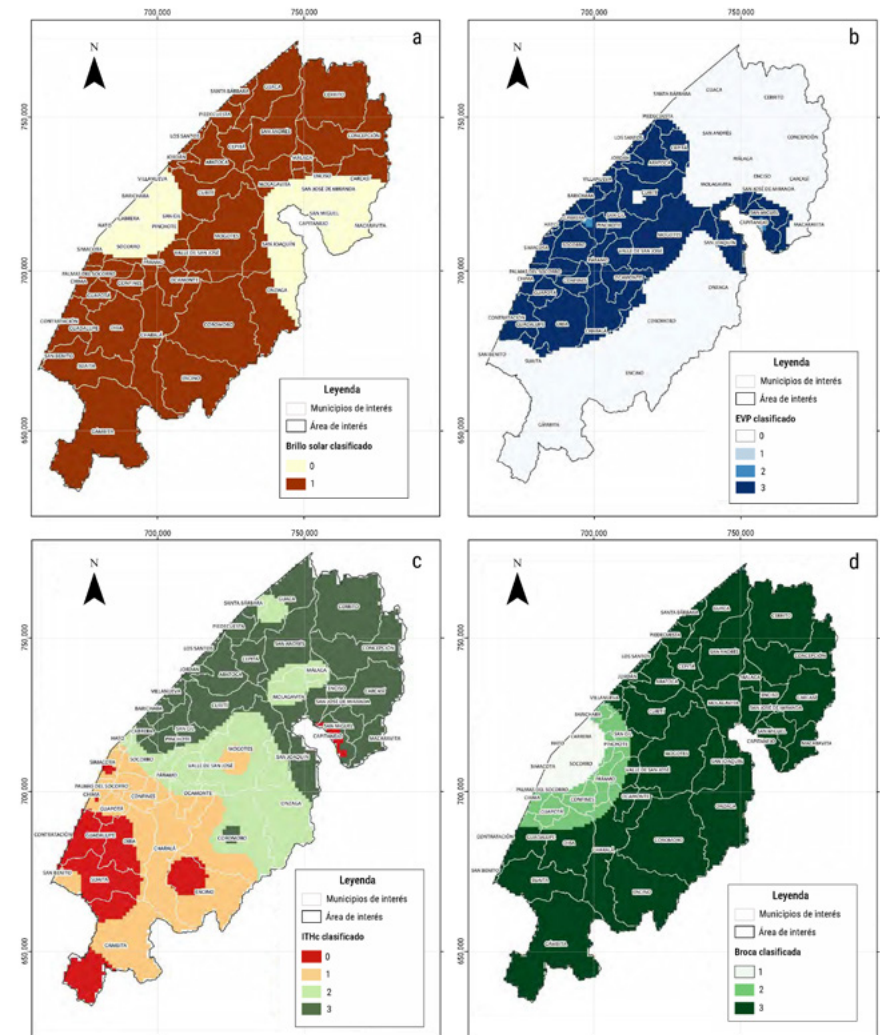
Fuente: IDEAM <http://dhime.ideam.govco/atencionciudadano/>.
 Nota: a) brillo solar (h/día) b) evapotranspiración del cultivo (mm/año) c) ITHc.

Figura 5 - Clasificación de aptitud para las diferentes variables climatológicas



Fuente: IDEAM <http://dhime.ideam.govco/atencionciudadano/> y del DEM de Vertex de <https://search.asfalaska.edu/>.
 Nota: a) temperatura media anual (°C), b) precipitación multiannual (mm/año), c) humedad relativa (%), y d) altitud (m.s.n.m).

Figura 6 - Clasificación de aptitud para las diferentes variables climatológicas



Fuente: IDEAM <http://dhime.ideam.govco/atencionciudadano/>.
 Nota: a) brillo solar (h/día), b) evapotranspiración del cultivo (mm/año), c) ITHc, y d) temperatura asociada a la broca (°C).

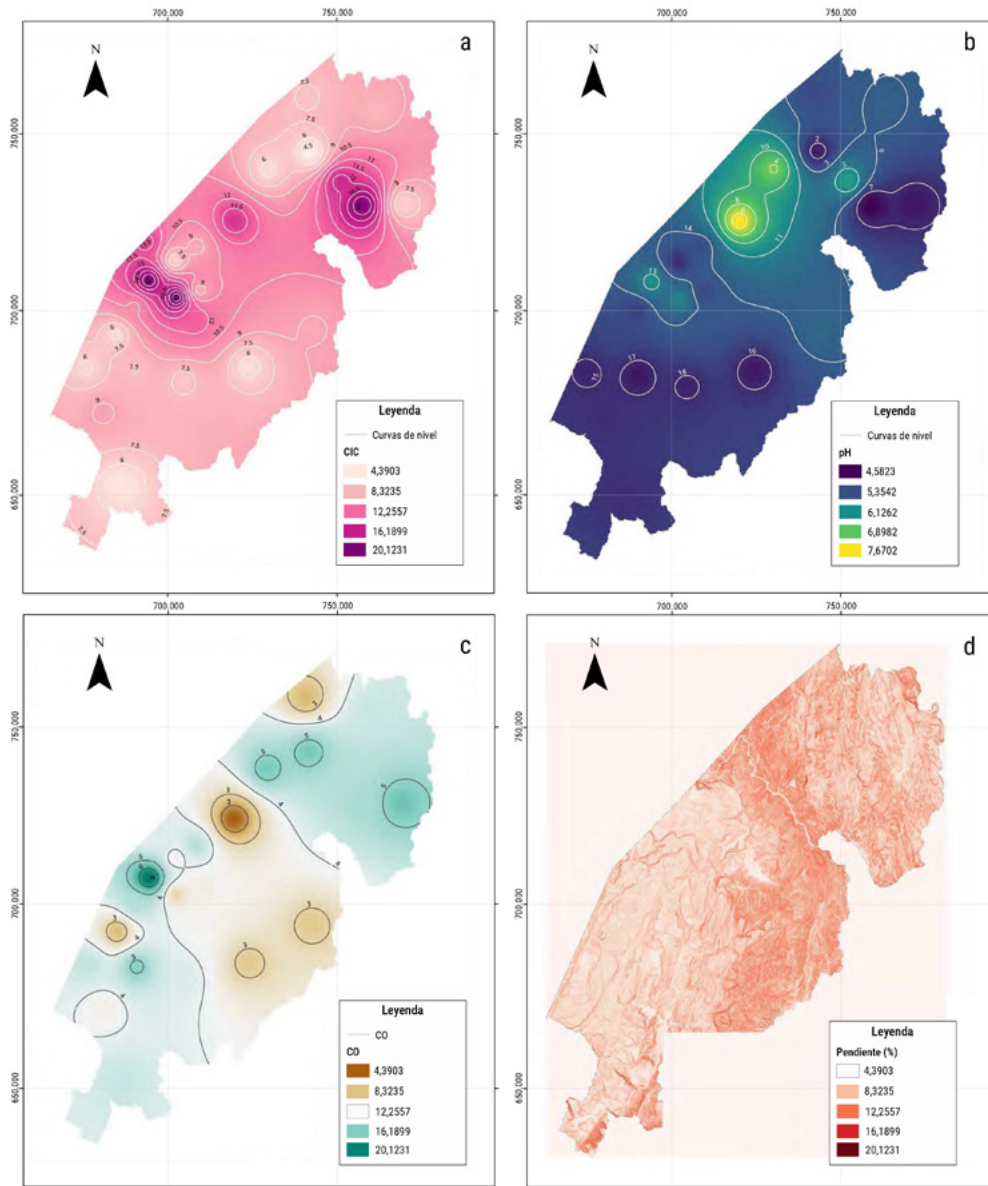
Edafología

Acidez (pH) y capacidad de intercambio catiónico
 En la Figura 7b, la interpolación por IDW del pH del suelo muestra valores altos de pH (alrededor de 7,7) en amarillo y valores bajos (alrededor de 5,0) en morado. La clasificación revela aptitud alta de pH para el cultivo de café en la zona de estudio, con algunas áreas no aptas (véase figura 8b). En la Figura 7a, la interpolación por IDW de la capacidad de intercambio catiónico muestra valores altos (más de 18 mol/kg) en azul y valores bajos (menos de 8 mol/kg) en tonos naranja y rojo. La clasificación indica que la mayoría de la zona tiene aptitud baja, aunque la región central presenta aptitud media para el cultivo de café. (véase figura 8a).

Carbono orgánico y pendiente

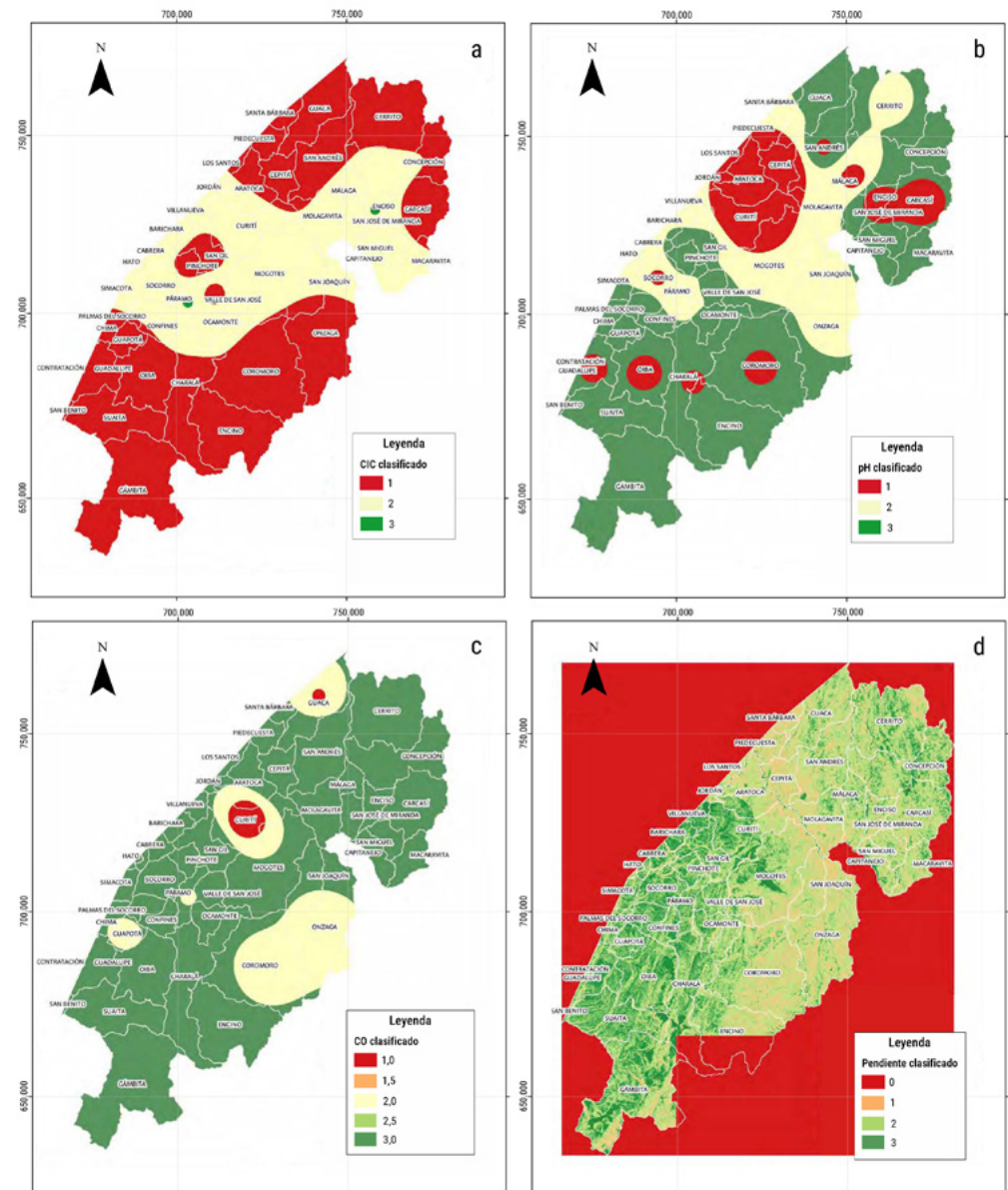
Como se observa en la Figura 7c la interpolación por IDW para el carbono orgánico en el suelo muestra colores café para valores bajos y la clasificación indica que la mayoría de la zona tiene aptitud 3 para el cultivo de café, es decir, es altamente apta como se ilustra en la Figura 8c. La pendiente se calculó a partir del DEM y se clasificó en porcentaje, revelando que la aptitud alta (3) se encuentra en el área central y sur, mientras que el resto de la zona tiene aptitud media y baja debido a pendientes superiores al 25% (véase figura 7d y 8d).

Figura 7 - Interpolaciones para las diferentes variables edafológicas



Fuente: IDEAM <https://geoportal.ligac.govco/contenido/datos-abiertos-agrologia>.
 Nota: a) capacidad de intercambio catiónico CIC (mol/kg), b) acidez (pH), c) carbón orgánico (%), y d) pendiente (%).

Figura 8 - Clasificación de aptitud para las diferentes variables edafológicas



Fuente: IDEAM <https://geoportal.ligac.govco/contenido/datos-abiertos-agrologia>.
 Nota: a) capacidad de intercambio catiónico CIC (mol/kg), b) acidez (pH), c) carbón orgánico (%), y d) pendiente (%).

Aptitud, uso del suelo y disponibilidad de oxígeno

Para la aptitud del suelo se clasificó por medio de un filtro en QGIS donde se agregó un nuevo atributo y se le asignó el valor de 0 a 3 dependiendo la aptitud. Luego de esto se procedió a hacer una interpolación y así se clasificó, donde se obtuvo lo siguiente.

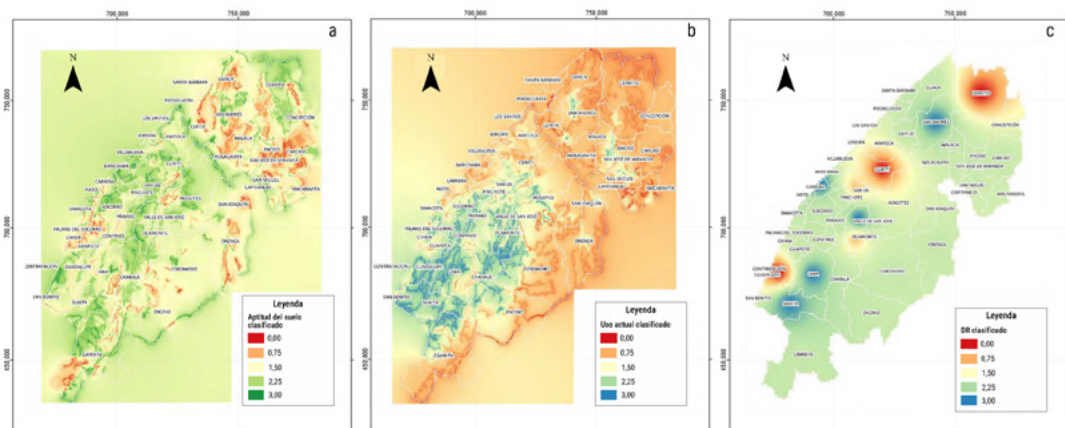
En la Figura 9a se muestra en color verde las zonas con altitud alta y en color naranja las zonas con aptitud baja, que según la Tabla 6 las regiones con aptitud alta presentan cultivos tecnificados de café, suelos profundos y moderadamente profundos, y para aptitud baja se requiere de suelos con prácticas de manejo de pastos, y ganadería.

Uso actual y drenajes

Como la aptitud se clasificó con un filtro donde se creó un nuevo atributo que asignaba la aptitud a cada índice. En la Figura 9b, se muestra una aptitud alta para un drenaje muy bueno, aptitud media para drenaje bueno, aptitud baja para drenaje regular y no apto para drenaje muy regular, con regiones en azul representando aptitud alta y el color rojo indicando regiones no aptas. Esto revela que la mayoría de la zona de estudio tiene aptitud media, es decir, drenaje bueno.

De estas clasificaciones se obtiene como resultado la Figura 9c donde se observa aptitud media y alta distribuidas de diferente manera para la zona de interés para el departamento de Santander.

Figura 9 - Clasificación de aptitud para las diferentes variables edafológicas



Fuente: IDEAM <https://geoportaligac.govco/contenido/datos-abiertos-agrologia>.
Nota: a) aptitud del suelo, b) drenaje del suelo, y c) uso actual del suelo.

Índices espectrales

Se adquirieron múltiples imágenes satelitales de Sentinel-2 para calcular índices de vegetación. Luego, se aplicó la corrección atmosférica utilizando el complemento SCP en QGIS para cada imagen. Posteriormente, se calculó el conjunto de índices de interés y se combinaron las capas correspondientes. En los municipios del sureste no se pudo obtener una imagen satelital para una pequeña área.

EVI y NDVI

El índice EVI muestra valores de 0 a 0,5 en toda el área, indicando vegetación saludable en general, con algunos valores de 1 correspondientes a zonas boscosas (véase figura 10a). La clasificación resulta en una aptitud alta-media alta-media en toda la zona de interés como se observa en la Figura 11a. En contraste, el índice NDVI presenta valores entre -0,2 y -0,9 en toda la superficie, sugiriendo áreas arenosas, rocosas, arbustos y vegetación variada, incluyendo bosques (véase figura 10e). Como se observa en la Figura 11e la clasificación revela principalmente una aptitud media en la mayor parte del terreno, con zonas de aptitud alta al norte del departamento.

BSI y NDWI

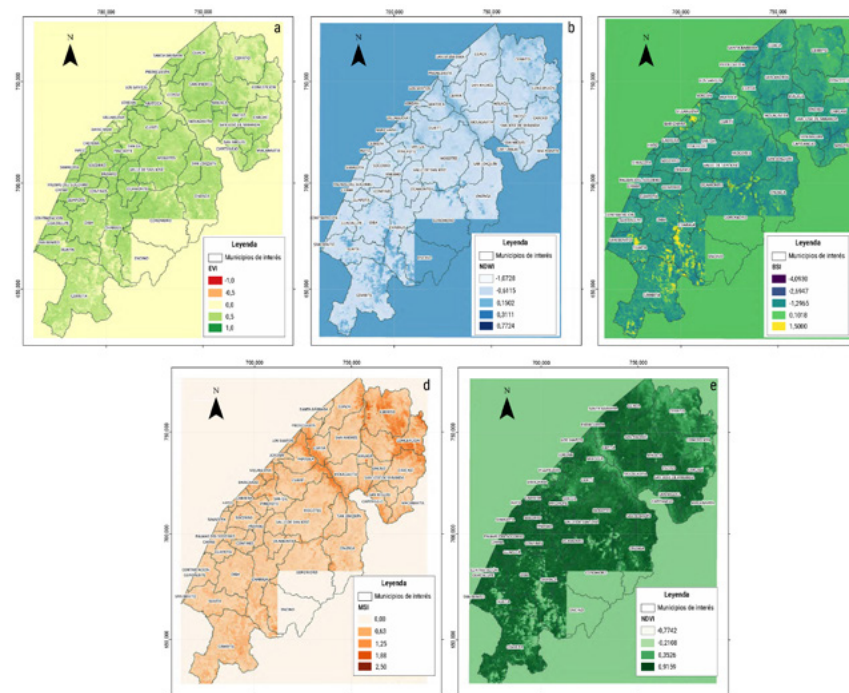
El índice de suelo desnudo (BSI) muestra valores entre 0,16 y 1,54 en todo el terreno, indicando escasas áreas sin cobertura vegetal

(véase figura 10c). La clasificación refleja una aptitud baja y media en toda la zona como se ilustra en la Figura 11c. Por otro lado, el índice NDWI detecta zonas con mayor humedad y cuerpos de agua, como el río Chicamocha que atraviesa los municipios de Piedecuesta a Molagavita, y pequeños lagos en el norte y centro de la zona (véase figura 10b). Como se observa en la Figura 11b la clasificación revela una pequeña área de aptitud alta y áreas de aptitud media en el norte, mientras que en el resto de la zona se observa una aptitud baja, debido a los rangos utilizados para identificar zonas sin cobertura vegetal y con baja humedad.

MSI

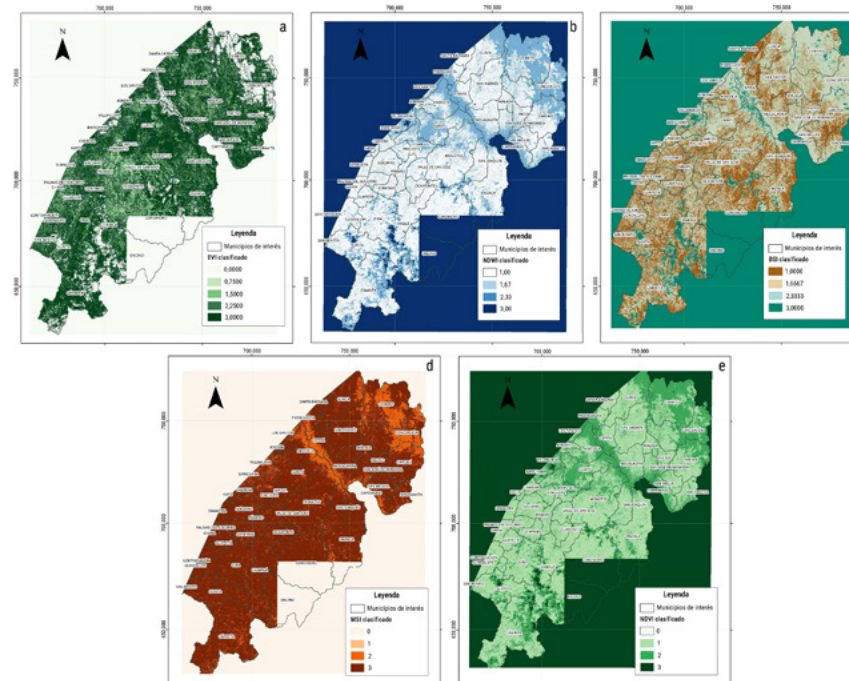
Para este índice se obtuvieron valores en la región entre 0,-1,88, por lo que se sobre entiende que se tienen valores bajos de estrés hídrico y un rango medio de contenido de agua en toda la superficie (véase figura 10d). En la clasificación observamos que para el terreno buscando coberturas vegetales con menor o poco estrés hídrico (0,4-1,0), toda la zona presenta una aptitud alta como se ilustra en la Figura 11d.

Figura 10 - Índices espectrales para la zona de interés



Fuente: Imágenes satelitales de <https://search.asf.alaska.edu/#/>.
Nota: a) EVI, b) NDWI (PH), c) BSI, d) MSI, y e) NDVI.

Figura 11 - Clasificación de índices espectrales para la zona de interés



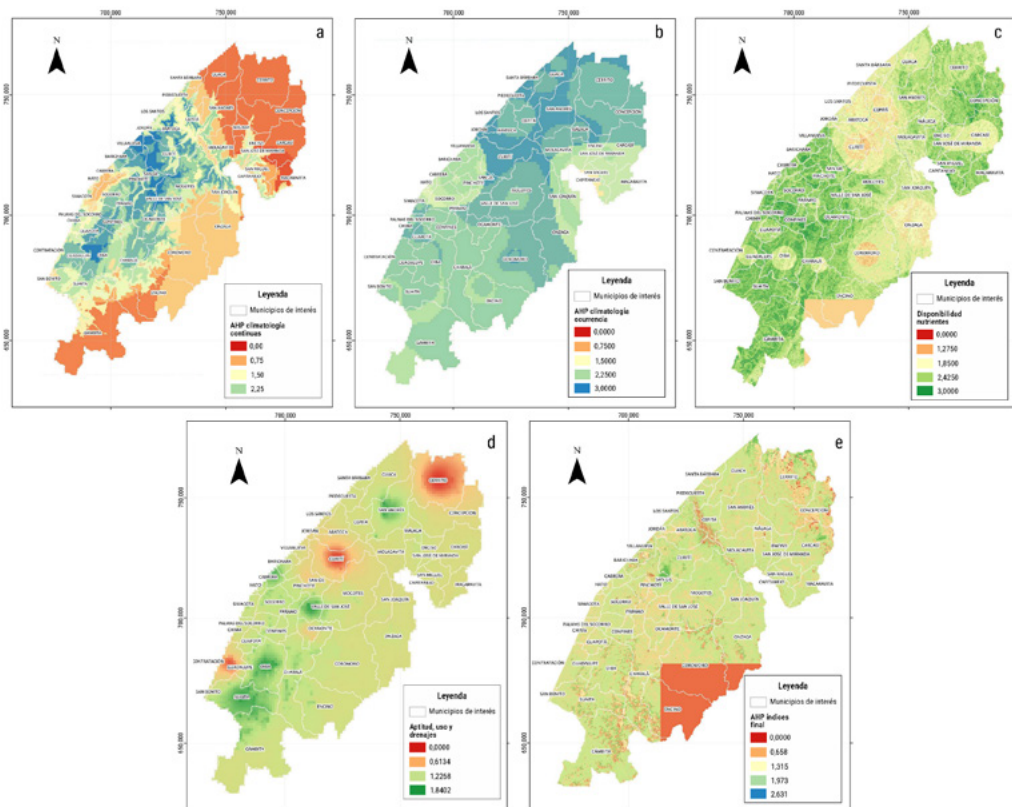
Fuente: Imágenes satelitales de <https://search.asf.alaska.edu/#/>.
Nota: a) EVI, b) NDWI (PH), c) BSI, d) MSI, y e) NDVI.

Como resultado y teniendo en cuenta los pesos de las matrices de cada uno de los criterios se obtuvo un AHP o evaluación multicriterio de la multiplicación ponderada por los pesos para cada uno de los indicadores como se presenta a continuación. Como se observa en la Figura 12 a y b) para las variables climatológicas la clasificación tiene como resultado que la aptitud alta y media predomina en toda la región central del área de interés.

Para las clasificaciones anteriores podemos observar que para las variables edafológicas predominan la zona sur del territorio

(véase figura 12 d y e), mientras que la clasificación de los índices espectrales se encuentra una aptitud media para toda la zona, excluyendo algunas zonas de centro, sur y norte del área como se ilustra en la Figura 12e. Finalmente se obtuvo el AHP final donde se consideró la suma ponderada de cada uno de los criterios anteriormente vistos y se encontró la zonificación agroecológica para el cultivo del café (*Coffea arabica* L) como se observa en la Figura 12.

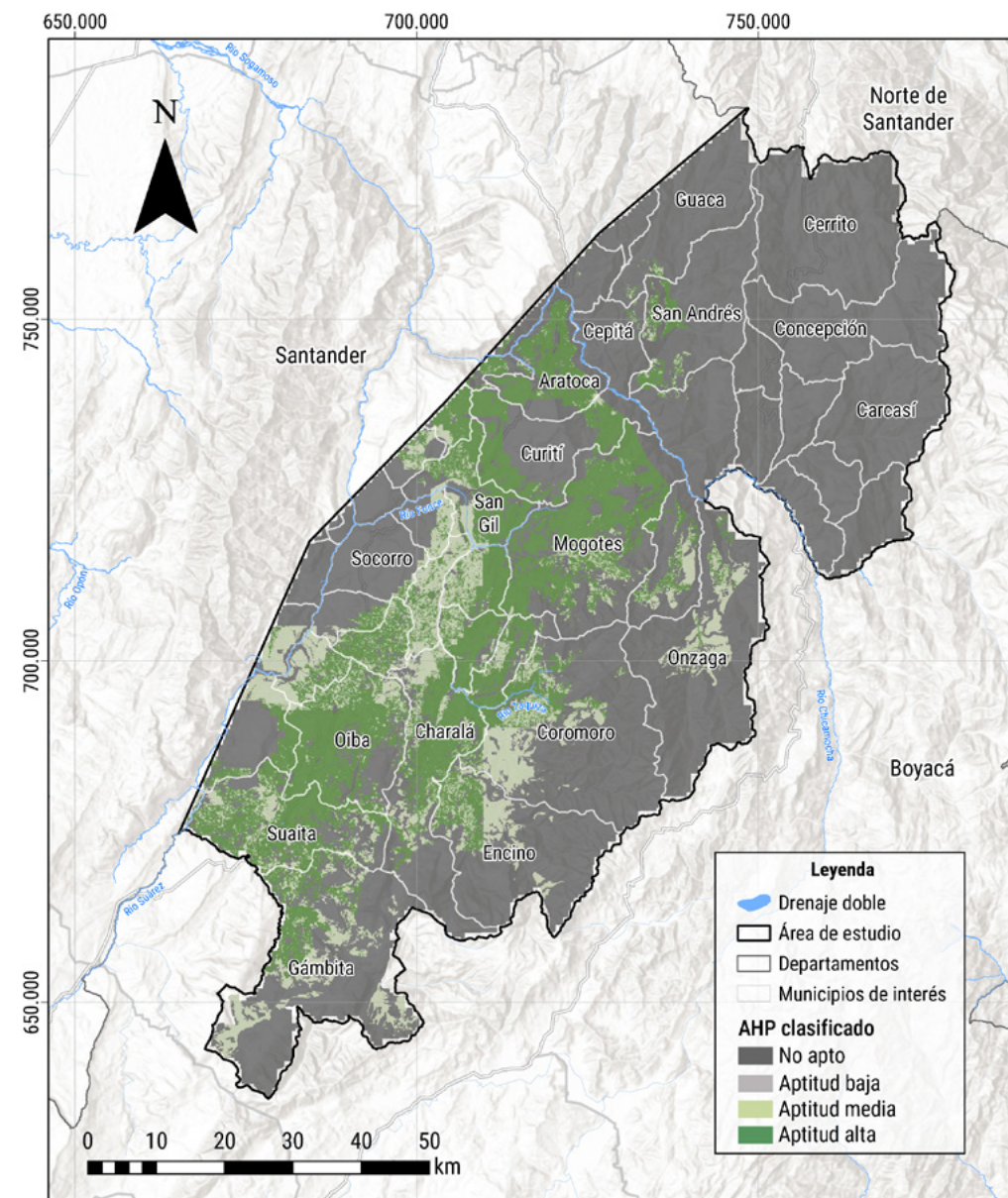
Figura 12 - AHP de clasificación de criterios



Nota: a) climatología para variables continuas, b) climatología de variables de ocurrencia, c y d) criterios edafológicos para disponibilidad de nutrientes, capacidad de laboreo y aptitud, uso y drenajes y e) clasificación para índices espectrales.

Sin embargo y dando alusión a que en la reclasificación no se encontraron zonas no aptas para el cultivo de café, esto se debe en gran parte al método empleado de suma ponderada, por lo que se procede a multiplicar esta capa con todas las variables que tengan un rango de valor de (0) no apto, como resultado y teniendo en cuenta la frontera agrícola también como variable se obtiene lo siguiente:

Figura 13 - Clasificación de multicriterio (AHP) para zonificación agroecológica del cultivo del café en el departamento Santander



Y a su vez se logró sacar las estadísticas por municipios, como se presenta en las siguientes tablas, para la aptitud media (2) y alta (3).

Tabla 10 - Área de aptitud media (2) para cada municipio

Aptitud	Municipio	Área municipio (m²)	Área de aptitud (m²)	Porcentaje (%)
2	Aratoca	169791551,80	5297300	3,12
2	Barichara	137275811,70	14202800	10,35
2	Cepitá	107967109,00	1952000	1,81
2	Charalá	419231350,60	222993700	53,19
2	Chima	173219022,10	1882800	1,09
2	Confines	71421700,43	18067400	25,30
2	Coromoro	577495746,00	45645400	7,90
2	Curití	244222737,00	3349700	1,37
2	Encino	400432691,40	107083200	26,74
2	Gámbita	608233066,10	71577300	11,77
2	Guaca	302398263,80	2123200	0,70
2	Guadalupe	146330709,40	30692600	20,97
2	Guapotá	67300363,97	54388100	80,81
2	Jordán	39899177,51	2587100	6,48
2	Los Santos	290125188,40	208900	0,07
2	Mogotes	483970127,30	26759300	5,53
2	Molagavita	180471702,00	1124500	0,62
2	Ocamonte	75221279,09	18714900	24,88
2	Oiba	286066747,70	54475000	19,04
2	Onzaga	489228436,90	50061600	10,23
2	Palmas del Socorro	58541119,72	6696700	11,34
2	Páramo	72981118,90	30348100	41,58
2	Piedecuesta	484572309,20	129300	0,03
2	Pinchote	55535419,04	767300	1,38
2	San Andrés	28155885,20	42132000	14,96
2	San Ebnito	59113022,18	5976700	10,11
2	San Gil	146877274,10	20892100	14,22
2	Socorro	127825834,90	2265300	1,77
2	Suaita	285195534,00	8100900	28,44
2	Valle de San José	81114938,89	16514400	20,36
2	Villanueva	97606913,27	7575800	7,76

Tabla 11 - Área de aptitud alta (3) para cada municipio

Aptitud	Municipio	Área municipio (m²)	Área de aptitud (m²)	Porcentaje (%)
3	Aratoca	169791551,80	661900	0,39
3	Barichara	137275811,70	7899800	5,75
3	Cepitá	107967109,00	7957100	7,37
3	Charalá	419231350,60	21513600	5,13
3	Chima	173219022,10	2462700	1,42
3	Confines	71421700,43	3004800	4,21
3	Coromoro	577495746,00	37239600	6,45
3	Curití	244222737,00	503300	0,21
3	Encino	400432691,40	3690400	0,92
3	Gámbita	608233066,10	19888500	3,27
3	Guaca	302398263,80	3339700	1,10
3	Guadalupe	146330709,40	3138200	2,14
3	Guapotá	67300363,97	1073700	1,60
3	Jordán	39899177,51	8269500	20,73
3	Los Santos	290125188,40	1563000	0,54
3	Mogotes	483970127,30	19266700	3,98
3	Molagavita	180471702,00	1073700	0,59
3	Ocamonte	75221279,09	5220700	6,94
3	Oiba	286066747,70	9092200	3,18
3	Onzaga	489228436,90	50063100	10,23
3	Palmas del Socorro	58541119,72	6425400	10,98
3	Páramo	72981118,90	30345500	41,58
3	Piedecuesta	484572309,20	220400	0,05
3	Pinchote	55535419,04	6844600	12,32
3	San Andrés	28155885,20	42770300	15,19
3	San Ebnito	59113022,18	646100	1,09
3	San Gil	146877274,10	21989400	14,97

Aptitud	Municipio	Área municipio (m²)	Área de aptitud (m²)	Porcentaje (%)
3	Socorro	127825834,90	813700	0,64
3	Suaita	285195534,00	78333800	27,47
3	Valle de San José	81114938,89	16274500	20,06
3	Villanueva	97606913,27	7455300	7,64

En la Tabla 10 se observa que el municipio de Guapotá tiene aproximadamente 80% de área con aptitud media, y los municipios de Valle de San José, Suaita, Ocamonte, Páramo, Guadalupe Encino, Confines y Charalá presentan más de 20% de área con aptitud media. En la Tabla 11 se observa que el municipio del Páramo tiene 41,5% de aptitud alta en su territorio, y los municipios de Valle de San José, Suaita, y Jordán tienen más del 20% de su área con esta aptitud para el cultivo de café.

Discusión

El análisis de las tablas proporcionadas revela información relevante sobre la distribución de la aptitud para el cultivo de café en diferentes municipios del departamento de Santander. La presencia de áreas con aptitud media y alta sugiere un potencial significativo para la producción de café en la región. Sin embargo, también es importante considerar cómo factores como el cambio climático podrían influir en la producción de café y las variedades cultivadas en esta área.

Como se esbozaba anteriormente el café es una planta sensible al clima y su producción está estrechamente ligada a las condiciones ambientales, incluyendo la temperatura, la humedad, la precipitación y la altitud. Santander, conocido por su diversidad climática y variedad de microclimas, ofrece variedades de café cultivadas en el departamento que varían según la altitud y la oferta agroclimática específica de cada área. En altitudes más bajas, donde las temperaturas tienden a ser más altas, se cultivan variedades como Caturra y Castillo, que son más resistentes al calor y a las enfermedades. Por otro lado, en áreas de mayor altitud, donde las temperaturas son más frescas, se prefieren variedades como Típica y Bourbon, que requieren condiciones más frescas para un óptimo desarrollo.

Sin embargo, el cambio climático presenta desafíos significativos para la producción de café en Santander y en todo el mundo. El aumento de las temperaturas, los cambios en los patrones de precipitación y la proliferación de plagas y enfermedades pueden afectar negativamente la producción de café y la calidad del grano. Por ejemplo, temperaturas más altas pueden provocar un aumento en la incidencia de enfermedades como la roya del café, mientras que la variabilidad en las precipitaciones puede afectar el desarrollo y la maduración de los granos.

La zonificación mediante el método multicriterio emerge como una herramienta potencial para abordar el cambio climático y mejorar la adaptabilidad de cultivos altamente sensibles a la temperatura, como el café. Esta metodología se perfila como una alternativa valiosa para el análisis, al emplear criterios comparativos que consideran variables directamente influenciadas por el clima.

Conclusiones

Se realiza la zonificación agroecológica para la implementación y adecuación del cultivo de café (*Coffea arabica* L) y el análisis de multicriterio para la zona de interés donde se presenta una

aptitud alta de 41,5% de su área para el municipio del Páramo y 20% para los municipios de Valle de San José, Suaita, y Jordán. Para la aptitud media se presenta el municipio de Guapotá con un 80% de su área con esta aptitud y los municipios de Valle de San José, Suaita, Ocamonte, Páramo, Guadalupe, Encino, Confines y Charalá, con un 20% de esta aptitud sobre su área. Según el análisis multicriterio propuesto se presentan los municipios no aptos y con aptitud Baja, entre ellos se encuentra todo el norte y algunas áreas del centro oriente del territorio entre ellos se destacan los municipios de Cerrito, Concepción, Carcasí, Enciso y San Miguel. Posterior a la zonificación para la adecuación del cultivo de café, se debería hacer un análisis de las variedades de café que tengan mejor rendimiento, sabor en taza, entre otros que mejoren la evaluación agrícola y comercial del producto final.

La implementación de índices espectrales para el análisis del terreno ofrece una perspectiva más detallada y actualizada de las condiciones del suelo y su idoneidad para el cultivo de café. Además, estos índices pueden ser valiosos para el seguimiento fenológico del cultivo, lo que permite una gestión más eficiente y precisa de las plantaciones. Es importante destacar que los municipios con mayor aptitud para la producción de café coinciden con aquellos que ya poseen una cantidad significativa de hectáreas sembradas, según lo indicado por la literatura revisada. Esto sugiere una correlación entre la aptitud del terreno y la actividad cafetalera actual en la región.

En relación con el cambio climático y los fenómenos extremos de variabilidad climática, como El Niño o La Niña, estos resultados son relevantes ya que ofrecen una visión más clara de cómo las condiciones climáticas influyen en la distribución y adaptabilidad del cultivo de café. La zonificación agroecológica y el análisis multicriterio pueden ser herramientas útiles para mitigar los impactos de estos fenómenos, al identificar áreas con mayor resiliencia climática y adaptabilidad para el cultivo de café. En conclusión, la integración de la zonificación agroecológica, el análisis multicriterio y el uso de índices espectrales proporciona un enfoque holístico y basado en datos para la planificación y gestión del cultivo de café en contextos cambiantes, como los asociados al cambio climático y la variabilidad climática extrema. Este enfoque es fundamental para promover la sostenibilidad y la resiliencia de la industria cafetalera frente a los desafíos climáticos actuales y futuros.

Referencias

Arciniegas, A., Carvajal, S. y Ovalles, V. (s.f.). Top siete de municipios cafeteros de Santander. *Periodico15*. <https://www.periodico15.com/top-siete-de-municipios-cafeteros-de-santander/>

Federación Nacional de Cafeteros. (Agosto de 2021). *La caficultura santandereana*. Café de Santander. <https://santander.federaciondefcafeteros.org/cafe-de-santander/>

Cárdenas Cutiérrrez, J. (2020). Editorial. La industria del café en Colombia. *Pre-sentación de un país productor: Colombia Federación Nacional de Cafeteros de Colombia*. San José de Costa Rica, 17 de noviembre de 1993. <https://federaciondefcafeteros.org/static/files/Cardenas%20-%20Industria%20del%20cafe%20en%20Colombia.pdf>

Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital. (Agosto de 2021). Uso actual del suelo. Glosario Catastral. <https://www.catastrobogota.gov.co/glosario-catastral/uso-actual-de-suelo>

Cisneros Zayas, E., Rey García, R., Martínez Varona, R., López Seijas, T. y González Robaina, F. (2015). Evapotranspiración y coeficientes de cultivo para el café en la provincia de Pinar del Río. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 24(2), 23-30.

Cortés, A. y Nalagón Castro, D. (1984). *Los levantamientos agrológicos y sus aplicaciones múltiples*. Bogotá DC: Universidad Jorge Tadeo Lozano.

EOS Data Analytics. (12 de 08 de 2022). Índices de vegetación en la agricultura digital. Tecnología Agrícola. <https://eos.com/es/blog/indices-de-vegetacion/>

Galvão, L. S., Formaggio, A. R. y Tisot, D. A. (2005). Discrimination of sugarcane Varieties in Southeastern Brazil With EO-1 Hyperion Data. *Remote Sensing of Environment*, 94 (4), 523-534. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.11.012>

Henaó Arismendy, J. (2015). *Evaluación del proceso de secado del café y su relación con las propiedades físicas, composición química y calidad en taza*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/56186/11282704502016.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

IDH. (2016). *Laboratorio de radiometría espectral*. España: Universidad de Cantabria.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2003). *Guía técnica colombiana gtc 91. Guía para el cultivo y beneficio de café orgánico*. ICONTEC. <https://acortar.link/CV1jvZ>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2021). Modelos digitales de elevación (MDE)-descripción. *INEGI*. <https://www.inegi.org.mx/contenidos/temas/mapas/relieve/continental/metadatos/mde.pdf>

Jackson, M. L. (1958). *Soil Chemical Analysis Englewood*. Prentice Hall, Inc.

Jaramillo, A., Arcila, J., Montoya, E. y Quiroga, F. (2006). La radiación solar; consideraciones para su estudio en las plantaciones de café (*coffea arabica* L). En editores (ed), *La radiación solar; consideraciones para su estudio en las plantaciones de café (coffea arabica* L). (pp. 12-22). Meteorología Colombia. URL

Jiménez, G. y Ocaña, O. (2014). Tratamiento con SIG y técnicas de evaluación multicriterio de la capacidad de acogida del territorio para usos urbanos: residenciales y comerciales. En M. T. Camacho Olmedo, J. A. Cañete Pérez y J. J. Lara Valle (Ed.). *El acceso a la información espacial y las nuevas tecnologías geográficas* (pp. 1509-1525). Universidad de Málaga.

Kumar, P., Pandey, P. Ch., Singh, B. K., Katiyar, S., Mandal, V. P., Rani, M., Tomar, V. y Patariya, S. (2016). Estimation of Accumulated Soil Organic Carbon Stock in Tropical Forest Using Geospatial Strategy. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 19 (1), 109-123. <https://doi.org/10.1016/j.jeirs.2015.12.003>

Manzano Lamar, D. A. y Oña Hidalgo, D. L. (2018). *Análisis de la espectroscopia de reflectancia para la determinación de las propiedades químicas de suelos agrícolas en la parroquia de Lloa*. [Tesis de Ingeniería, Universidad de las Fuerzas Armadas]. <https://repositorioespedu.ec/bitstream/21000/15265/1/T-ESPE-040525pdf>

Molina, A. y Karla, L. (2016, agosto 31). ¿Cómo Influye la altura en el café y su sabor en la taza? *Perfect Daily Grind*. <https://acortar.link/Wg9yb>

Muñoz Aguayo, P. (2013). *Apuntes de teledetección: Índices de Vegetación*. Centro de Información de Recursos Naturales. <https://acortar.link/S7QVQR>

Navarra. (2021). *Climatología. Meteorología y climatología de Navarra*. <http://meteo.navarra.es/definiciones/climatologia.cfm>

Ocampo López, O. L. (2018). *Modelación hidrológica y agronómica de los efectos del cambio y variabilidad climática en la producción cafetera en Caldas*. [Tesis de doctorado, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/63694>

Oliveira, R. (2019, octubre 22). *Cultivo de café: cómo mejorar la calidad del suelo*. Perfect Daily Grind. <https://perfectdailygrind.com/es/2019/10/22/cultivo-de-cafe-como-mejorar-la-calidad-del-suelo/>

Osorio Hernandez, R., Guerra García, L. M., Ferreira- Tinôco, I., Osorio-Saraz, J. A. y Aristizábal-Torres, I. D. (2015). Simulation of a Thermal Environment in Two Buildings for the Wet Processing of Coffee. *DYNA*, 82(194), 214-222. <https://doi.org/10.15446/dynav.82n194.49526>

Pérez-Portilla, E. y Geissert-Kientz, D. (2006). Zonificación agroecológica de sistemas agroforestales: el caso café (*Coffea arabica* L.) – palma camedor (*Chamaedorea elegans* Mart.). *Interciencia*, 31(8), 556-562.

Puerta Quintero, G. I. (2006, octubre). *La humedad controlada del grano preserva la calidad del café*. Avances Técnicos 352, Cenicafé. Gerencia Técnica – Programa de Investigación Científica. Chinchiná: Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/418/1/avto352.pdf>

Ramírez, V., Jaramillo, J. y Arcila, J. (2013). Factores climáticos. *Manual cafetero colombiano*, (Vol. 1) (pp. 205-237). Bogotá D.C.: FCN-Cenicafé.

Restrepo Salazar, J. C. (2005). La evaporación y la evapotranspiración. *Clima andino y café en Colombia* (pp. 80-97). Chinchiná, Colombia: Cenicafé.

Rojas, O. E. (1987). *Zonificación agroecológica del café (Coffea arabica) en Costa Rica* ICCA. San Jose, Costa Rica, Instituto interamericano de cooperación para la agricultura.

Salazar, S., Hoyos, J., Quiroga-Mosquera, A. y García-López, J. C. (2019). Zonas Agroecológicas, Aplicación de ciencia, tecnología e innovación en el cultivo del café ajustado a las condiciones particulares del Huilaparticulares del Huila. *Zonas Agroecológicas, Aplicación de ciencia, tecnología e innovación en el cultivo del café ajustado a las condiciones particulares del Huilaparticulares del Huila* (10-3). Bogotá, DC. Colombia: Cenicafé.

Salvatore, M., Kassam, A., Guitiérrez, C., Bloise, M. y Marinelli, M. (2010). *Metodología de evaluación de aptitud de tierras En Bioenergía y seguridad alimentaria BEFS: el análisis BEFS para el Perú*. Lima: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

Soil Science Society of America. (1995). Statement on Soil Quality. *Agron. News*, 6-7.

Soil Science Society of America. (2018). *Glossary of Soil Science Terms* <https://www.soils.org/publications/soils-glossary#>

Unidad de Planificación Rural Agropecuaria. (2021). *Zonificación de aptitud para el cultivo de café (Coffea arabica L.) escala 1:100.000, en Colombia*. Bogotá D.C.: UPRA.

United State Department of Agriculture. (1961). *Land Capability Classification. Agricultura Handbook 210*. Soil Conservation Service. <https://www.govinfo.gov/content/pkg/GOVPUB-A-PURL-gp020777/pdf/GOVPUB-A-PURL-gp020777.pdf>

Villatoro, B. (2020). *Uso de índices de vegetación NDWI y MSI obtenidos de imágenes satelitales Sentinel-2 y Landsat 8 para monitoreo de humedad, como indicador de momento óptimo de cosecha en caña de azúcar*. Memoria Presentación de resultados de investigación Zafra. Guatemala, Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar (CENGICANA).

Wintgens, J. N. [ed.]. (2009). *Coffee: Growing, processing, Sustainable Production: Aguidebook For Growers, Processors, traders and researchers*. Reino Unido:Wiley-VCH.

Anexos

Anexo 1 - Tabla resumen

Categoría	Reglas de decisión	Criterios	Parámetro	Parámetro espacial	Aptitud				Zona más favorable	Peso según clasificación			
					Alta	Media	Baja	No apta					
Climatológica	Condiciones climáticas	Variables continuas en el espacio	Temperatura media anual	°C	Isotermas	19-22	16-19 y 22-24	24-25	<16 y >25	Áreas con aptitud alta	145		
			Humedad relativa	%	Área de aproximación	70-85%	65-70%	< 65%	> 80%		159		
			Evapotranspiración del cultivo	mm/año	Área de aproximación	1.400-1.100	1.400-1.500	> 1500	< 1100		0,0		
			Altitud	m.s.n.m.	Área de aproximación	1300-1700	1700-2.000	1.000-1.300	<1.000 y >2.000		85		
		Variables de ocurrencia	Brillo solar	h/día	Área de aproximación	5-6	6-7	<5	-		0,0		
			Precipitación	mm/año	Isoyetas	>2800	1.400-2.800	<1.400	-		16,3		
			ITIC	rango	Área de aproximación	0,7 - 1,5	1,5 - 2	2-2,5	> 2,5 y < 0,7		11,1		
		Ecológicas	Suelos y características	Disponibilidad de nutrientes y capacidad de laboreo	Acidez (pH)		Capa tipo shape de clases	5,0 - 5,5	5,5 -6,0		< 5,0 y > 6,0	-	13,7
					Capacidad de intercambio catiónico	mol/kg	Capa tipo shape de clases	>19	10-19		<10	-	6,0
					Carbono orgánico	%	Capa tipo shape de clases	> 3,5	2,5 - 3,5		< 2,5	-	10,0
Aptitud y uso del suelo	Pendiente			Porcentaje	Capa DEM	< 25	25-75	> 75	-	26,0			
	Aptitud			Capas	Capa DEM		Cultivos tecnificados de café en suelos profundos y moderadamente profundos para cultivos permanentes	Aptas para cultivos de ciclo vegetativo corto	Con adecuadas prácticas de manejo de pastos, ganadería	Reforestación bosques protector y otros	15,7		
	Uso Actual			Capas	Capa tipo shape de clases	Sin cobertura y con aptitud agrícola	Cultivos transitorios	Cultivos permanentes	Bosques o reservas ecológicas o zonas urbanas	8,0			
Índices	Índices espectrales	Aptitudes de Vegetación	Drenajes	Rango	Capa tipo shape de clases	Buen drenaje	Bueno	Regular	-	22,5			
			EVI	Rango	Determinar áreas para café	0,2-0,5	0,5-0,8	-1,0 y > 0,8	-	35,5			
			NDVI	Rango	Determinar áreas para café	0,2-0,4	0,41-0,5	0,6 - 1,0	-1 - 0	26,9			
			BSI	Rango	Determinar áreas para café	> 0,1	0,1 - 1	< 1	-	13,2			
Fitosanitario	Susceptibilidad fitosanitaria	Temperatura asociada a la broca del café	Temperatura media	Rango	Isotermas	< 22	22-24	> 24	-	100,0			
						NDWI	Rango	Determinar áreas para café	-0,1 -0,7	- 0,1 - -0,6	-0,6 - 1	-	12,4
						MSI	Rango	Determinar áreas para café	0,4 - 1	1 - 2	2 - 3	> 3	12,1

Fuente: literatura citada

Tensiones en torno a las representaciones y autorrepresentaciones de lo indígena en el Guaviare por la incidencia del turismo

Tensions Around the Representations and Self-representations of the Indigenous in Guaviare due to the Impact of Tourism

Sara Stefania Ruiz Sepúlveda¹ 

Axel Nicolás Arbeláez Vargas² 

Michaela Bartmann³ 

Resumen

Con los Acuerdos de Paz, al país llegaron nuevas oportunidades y el turismo volvió a ser una opción. En el caso del Guaviare, el departamento comenzó a recibir turistas nacionales y extranjeros. Algunos de sus habitantes, entre ellos los indígenas, quienes tienen una presencia notable en el Guaviare, tratan de emprender y establecer un camino hacia un turismo indígena o un etnoturismo, mientras que las poblaciones del casco urbano buscan emplear otros modelos. Este trabajo explora las tensiones existentes entre las representaciones y autorrepresentaciones de lo indígena, así como los conceptos que fundamentan otras formas de hacer turismo. Se hace uso de una metodología cualitativa, desarrollando entrevistas semiestructuradas, grupos de discusión y análisis de fotos. Se concluye que, en lo que respecta al turismo, falta mejorar la comunicación entre los diferentes actores. Se debe trabajar para que no se siga perpetuando una imagen prejuiciosa de lo indígena. También, se observó que las representaciones y autorrepresentaciones divergen significativamente lo que se convierte en un obstáculo para los pueblos indígenas y para los turistas que los visitan debido a las preconcepciones frente a lo que encuentran y, por tanto, dificultan el desarrollo de un turismo indígena o etnoturismo.

Palabras clave:

artesanía, comunidades, población indígena, relaciones interétnicas, representaciones, turismo cultural.

Cómo citar

Ruiz Sepúlveda, S. S., Arbeláez Vargas, A. N. y Bartmann, M. (2024). Tensiones en torno a las representaciones y autorrepresentaciones de lo indígena en el Guaviare por la incidencia del turismo. *Análisis Geográficos*, 57(1), 122 - 139.

¹ Universidad Nacional de Colombia. sruize@una.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0663-3397>.
² Universidad Nacional de Colombia. anarbelaezv@una.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4629-7447>.
³ Universidad de Heidelberg. mbartmann@una.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9285-3466>.

Abstract

With the Peace Accords, new opportunities came to the country, tourism became an option again. In the case of Guaviare, the department began to receive visitors, national and foreign tourists. Some of its inhabitants, among them the different indigenous communities, who have a notable presence in Guaviare, try to undertake and establish a path towards indigenous tourism or ethno-tourism, while the populations of the urban center seek to employ other models. This paper explores the existing tensions between the representations and self-representations of the indigenous, as well as the concepts that underlie other forms of tourism. A qualitative methodology is used, developing semi-structured interviews, discussion groups and photo analysis. It is concluded that in terms of tourism, communication between the different actors needs to be improved, and work should be done to prevent the perpetuation of a prejudiced image of the indigenous. It is also observed that representations and self-representations diverge significantly, which becomes an obstacle for indigenous peoples and for tourists who visit them due to preconceptions about what they find and, therefore, hinder the development of indigenous tourism or ethnotourism.

Keyword:

crafts, communities, indigenous population, interethnic relations, representations, cultural tourism.

Introducción

La población indígena del Guaviare se compone de 6.856 habitantes que representan el 8,3% del total para 2018, según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística para 2018, de los cuales el 75% se localiza en el sector rural (DANE, 2018). El departamento del Guaviare tiene más de 30 asentamientos indígenas que cuentan con una tradición oral desarrollada (Defensoría del Pueblo, 2023). Sin embargo, estas comunidades poseen un alto riesgo de extinción física y cultural a causa de factores como el conflicto armado, enfermedades y la occidentalización (Mendoza, 2022). El riesgo de extinción no es algo nuevo, desde la colonización los grupos indígenas latinoamericanos han sido víctimas de grupos hegemónicos dominantes con narrativas en las que lo indígena se concibe como subalteridad; esto crea, recrea y difunde ideas, narraciones y representaciones con el fin de justificar sus acciones (Villagrán Muñoz, 2016).

Actualmente, en el llamado trapecio Amazónico, el turismo es considerado la mejor opción para el desarrollo económico. No obstante, en estos territorios se recomienda pensar y realizar un turismo diferenciado que se ajuste a los ecosistemas y no afecte su capacidad de carga. Para esto, se piensa en un turismo diferente al de masas, como el eco y etnoturismo.

El etnoturismo se relaciona con el turismo cultural, se caracteriza por buscar conocer lo llamativo y lo típico de los estilos de vida tradicionales y en este predomina la visualización por la etnicidad del otro, definidos principalmente por imaginarios (Barreto, 2005; Morales González, 2008; Gallego Acevedo, 2011).

Parece que el turismo en la Amazonía es resultado de los procesos de divulgación de imágenes, ya sean narraciones o audiovisuales, tanto nacionales como extranjeras, las cuales muchas veces muestran de manera superficial o equívoca a la Amazonía, enseñando a los indígenas como seres salvajes sin contacto con los “blancos” (Ochoa, 2018).

Este turismo es un fenómeno que genera una nueva ocupación y uso no solo de la Amazonía, sino también del Guaviare, implica un contacto superficial con la naturaleza y las culturas locales, en el que la visita a los asentamientos indígenas es más bien un

montaje artificial con el objetivo de comprar artesanías y vivir una experiencia con lo “salvaje” (Souza et al., 2021). Esto genera que muchas veces se privilegien las necesidades de los turistas por encima de las necesidades de la población local (Ochoa, 2018). Es por esto que se quiso investigar sobre las posibles tensiones en torno a las representaciones y autorrepresentaciones de las comunidades indígenas en San José del Guaviare por la incidencia del turismo (Sanabria Martínez, 2016; Gómez Manrique, 2018).

El trabajo se divide en tres momentos: el primero trata de evidenciar cuáles son las perspectivas turísticas en torno a los lugares indígenas del Guaviare; el segundo busca comprender la manera como se producen y venden artesanías indígenas en San José del Guaviare, y el tercero analiza la promoción de las imágenes y las representaciones de lo indígena en el casco urbano de San José del Guaviare.

El Guaviare: un territorio con una multiterritorialidad compleja

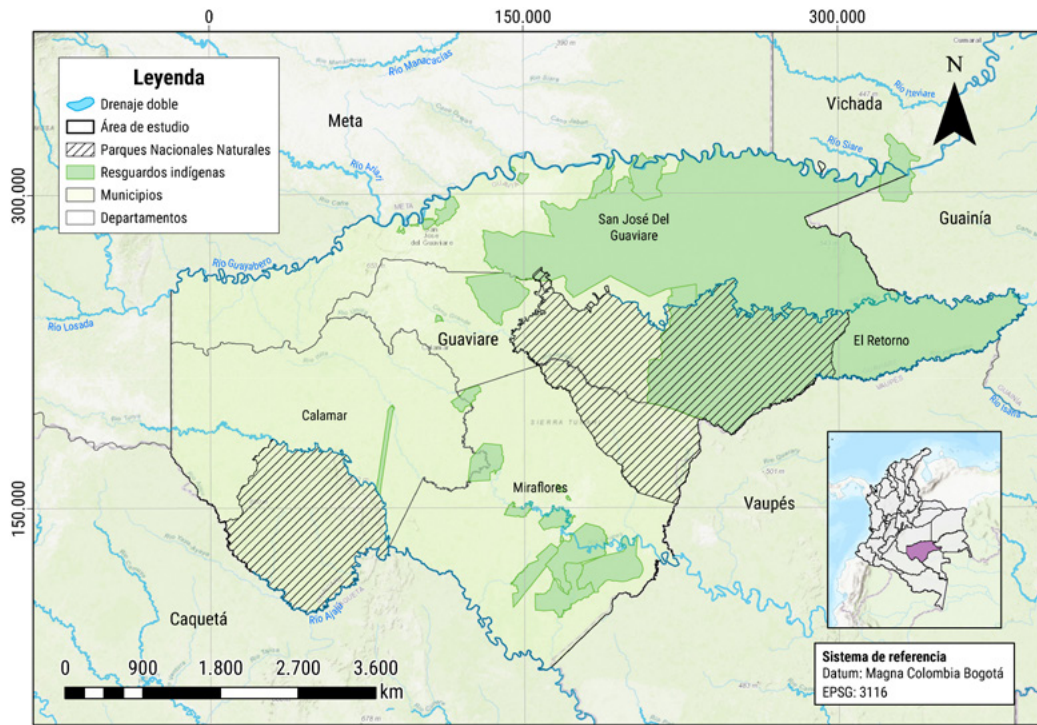
El departamento del Guaviare es uno de los 32 departamentos de Colombia y está situado en la región amazónica del país. Limita al norte con el departamento del Meta, al sur con el departamento del Vaupés, al este con el departamento del Vichada y al oeste con el departamento de Caquetá. Está conformado por cuatro municipios: San José del Guaviare (capital), Calamar, El Retorno y Miraflores (Figura 1).

El Guaviare se caracteriza por su variada geografía que incluye selvas tropicales, ríos, caños y llanuras. Es una región rica en biodiversidad, con numerosos atractivos naturales y una gran variedad de flora y fauna.

La economía del Guaviare se basa en la agricultura, la ganadería, la pesca, la explotación forestal y el turismo ecológico. La cultura de la región refleja una mezcla de influencias indígenas y coloniales, con tradiciones, festividades y gastronomía propias de la región amazónica.

Es uno de los departamentos menos densamente poblados de Colombia y fue creado en 1991 con la Constitución de Colombia.

Figura 1 - Mapa de localización área de estudio



Esta área ha sido originariamente habitada por indígenas de las etnias Tucano, Cubeo, Piratapupuyo, Nahibo, Carijona, Sikuaní y Guayabero. Para 1950, en época de violencia, llegaron los colonos con procedencia de la región de los Llanos y del Tolima a causa de políticas estatales en las que le prometían predios a cambio de talar árboles. En 1960 llegaron los Tucanos con procedencia del Vaupés y para 1966 se genera el primer contacto con los Nukak. Para 1998, se establecen zonas para las Fuerzas Armadas Revolucionarias de Colombia (FARC) (Del Cairo, 2011) y es hasta 2016 que se generan los Acuerdos de Paz y se da apertura al turismo (Gobierno Nacional y las Fuerzas Armadas Revolucionarias de Colombia-Ejército del Pueblo [FARC-EP], 2016).

Es un departamento con una complejidad territorial, producto de sus procesos de ocupación (Escobar, 2014). Parte de esta historia permite comprender el porqué las comunidades indígenas están optando por el turismo cultural, ecológico o etnoturismo como alternativas de “desarrollo”.

Metodología

El estudio de las tensiones en torno a las representaciones y autorrepresentaciones de las comunidades indígenas del Guaviare debido a la incidencia del turismo es un tema complejo que requiere un enfoque metodológico cuidadoso y holístico. Para este trabajo se optó por una metodología cualitativa.

Se inició con un proceso de revisión y análisis de literatura académica, informes gubernamentales y documentos de ONG. Se estableció un marco teórico que guiará el estudio, lo que implicó la selección de conceptos clave que permitieran la aproximación a la problemática como etnoturismo, turismo indígena, identidad, cultura, y autorrepresentaciones (Vallejo, 2015; Espeso-Molinero y Pastor-Alfonso, 2017).

Posteriormente, se trabajó en el diseño de la investigación, definir preguntas de investigación específicas y seleccionar un enfoque metodológico. Una vez avanzadas las etapas de diseño metodológico, se realizó el trabajo de campo, a través de visitas y recorridos a diferentes espacios de interés turístico y sagrado, como la puerta de Orión, Raudal del Guayabero, Cerro Azul, entre otros. De igual forma, se aplicaron entrevistas semiestructuradas a habitantes de la ciudad, a capitanes de las comunidades indígenas, guías turísticos. Además, se trabajó con grupos de discusión con los pueblos Tucano Oriental y los Jiw. Se empleó la observación participante en actividades turísticas y cotidianas para prestar atención a las interacciones y representaciones. Finalmente, se ejecutó un ejercicio de cartografía social en el Resguardo Indígena Itilla a fin de identificar cómo se distribuye actualmente el territorio, cómo se ven frente al turismo y la cosmovisión territorial.

Por la naturaleza de la investigación, las técnicas de muestreo fueron seleccionadas de acuerdo a la dinámica del trabajo de campo. Todos los actores locales entrevistados fueron contac-

tados y entrevistados por medio de los recorridos desarrollados y los contactos generados en el casco urbano, los resguardos indígenas y los sitios turísticos/sagrados.

Bajo este esquema de trabajo se elaboraron 29 entrevistas en profundidad, dos grupos de discusión (uno con los Tucanos y uno con los Jiw) y un registro fotográfico que aportó al análisis de los sitios turísticos/sagrados. Este registro cuenta con 129 fotografías.

El análisis de datos consistió en la codificación y análisis temático de entrevistas, grupos focales y observaciones. Se realizó un análisis crítico del discurso, examinando cómo se construyen y perpetúan las representaciones en el discurso turístico y mediático. Se triangularon los datos recopilados a través de la comparación y el contraste de las diferentes fuentes de datos.

Resultados y discusión

La comercialización de los lugares indígenas: ¿visión compartida o punto de venta controvertido?

El Guaviare es multiterritorial, los actores que lo ocupan y territorializan son múltiples y generan territorialidades superpuestas, se caracteriza por un colonialismo interno y desarrollo desigual (Escobar, 2014; Agnew y Oslender, 2010; Haesbaert, 2013) y por la presencia de comunidades indígenas con distintas cosmovisiones y conflictivas.

Este departamento se enfrenta a una complejidad territorial porque los territorios indígenas del Guaviare han sido susceptibles de ser comercializados para el turismo, se pueden encontrar

los resguardos y hogares reales de las diferentes comunidades indígenas y los lugares originalmente sagrados y espirituales (Gupta y Ferguson, 2008; Espeso-Molinero y Pastor-Alfonso, 2017). Se encuentran diferentes comunidades indígenas con opiniones contrastantes respecto al turismo como una actividad económica que puede promover mejores niveles de calidad de vida, así como representantes del Estado y proveedores de servicios turísticos (guías turísticos, vendedores).

En la Figura 2 se pueden ver los diferentes resguardos indígenas con los que se tuvo algún acercamiento, ya sea por medio de una visita al lugar o una comunicación con sus representantes —capitán o capitana—.

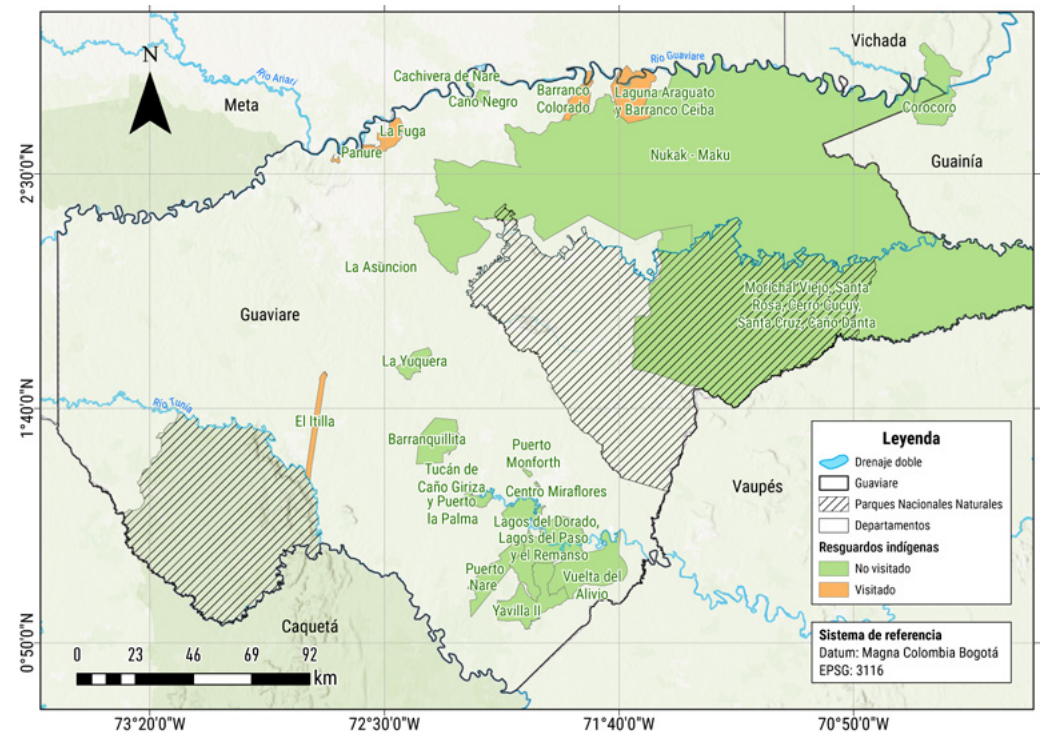
Las comunidades indígenas del Guaviare y su actitud hacia el turismo

Durante el trabajo de campo se logró establecer contacto con varias comunidades indígenas como los Tucano Orientales, los Jiw y con organizaciones que pudieron informar sobre los Nukak.

Los Tucano Orientales son parte de un grupo más amplio de pueblos indígenas conocidos como los pueblos Tucano. Estos pueblos indígenas están distribuidos principalmente en la región del Vaupés, en la Amazonía colombiana, pero también se encuentran en áreas del Guaviare y otros departamentos amazónicos de Colombia, así como en regiones adyacentes de Brasil.

Entre los resguardos Tucano Orientales se encuentran Itilla, Panuré, La Fuga, El Refugio y La Asunción, con los tres primeros se logró realizar una visita y conversar con sus capitanes para conocer

Figura 2 - Resguardos indígenas del Guaviare



su percepción sobre el turismo. En el caso de El Refugio se logró una conversación con el capitán y con el Resguardo La Asunción no se pudo establecer contacto. Dentro de las comunidades a las que se denominan Tucano Orientales existen otras tribus como los Tezanos, los Curripacos y los Tatuyos, estos provienen de la misma región en la frontera con Brasil, tienen costumbres similares y comparten bien los resguardos.

La posición de los Tucano Orientales sobre el turismo es un tema complejo y multifacético, pues puede variar significativamente entre diferentes comunidades y miembros individuales. Sin embargo, frente a la valoración de la cultura y tradiciones, los Tucano Orientales pueden ver el turismo como una oportunidad para preservar y compartir su cultura, tradiciones y conocimientos ancestrales con un público más amplio. Existe una preocupación por mantener la autenticidad de sus prácticas culturales y evitar su comercialización excesiva.

El turismo puede ser visto como una fuente adicional de ingresos que complementa las actividades tradicionales como la agricultura y la artesanía. Algunos miembros de la comunidad pueden apoyar el turismo como un medio para el desarrollo local, incluyendo mejoras en infraestructura y servicios básicos.

Expresan preocupación por los posibles impactos negativos del turismo en la estructura social y las dinámicas comunitarias, incluyendo la introducción de valores y comportamientos externos. Y manifiestan la importancia de que las comunidades tengan control sobre cómo se desarrolla el turismo y cómo se representa su cultura. La autodeterminación en el manejo de las actividades turísticas es fundamental. Hay un interés creciente en formas de turismo sostenible que respeten el medio ambiente y las prácticas tradicionales de manejo de recursos.

Los Tucano Orientales suelen tener una actitud muy positiva hacia el turismo, no solo vendiendo artesanías, sino también organizando veladas, danzas, gastronomía y contando historias o compartiendo su medicina tradicional. En las visitas se logró recoger que las generaciones más jóvenes proyectan un futuro donde el turismo mejore las bases materiales de sus comunidades, con mayor acceso a través de infraestructura vial, escuelas, tecnología. Sin perder su relación con su entorno natural.

Sin embargo, los adultos manifestaban sus preocupaciones por la pérdida de su cultura, aun cuando manifestaron que sus tradiciones son celosamente cultivadas y protegidas. Algunos miembros expresaban que parte de sus tradiciones no son compartidas con los colonos.

Otras de sus preocupaciones son: la necesidad de educar a los turistas sobre las normas y valores culturales de sus comunidades para fomentar el respeto y la comprensión mutua, la capacitación en gestión turística, idiomas y habilidades de comunicación y la generación de productos turísticos. Este último implica la transformación de su cultura, alimentos y espacios para que sean productos de consumo para los turistas (Mansvelt, 2005).

Por el contrario, los Jiw, ubicados en los resguardos de La María y Barrancón, son escépticos a los colonos, a los no-indígenas; mientras algunos acogen el turismo de forma parcial, otros no lo aceptan. En las entrevistas que realizamos percibimos una actitud hostil hacia la cultura occidental y los colonos, ya que estos los desplazaron y

limitaron la movilidad de sus pueblos, reasentándolos y alterando su forma de vivir. Estos cambios distorsionaron sus actividades originales de caza, pesca y siembra.

Para ellos, el turismo pueda llevar a la comercialización excesiva de la cultura Jiw, desvirtuando prácticas tradicionales y rituales. La presión para adaptar las tradiciones y costumbres a las expectativas de los turistas puede resultar en una pérdida de autenticidad cultural.

Los Jiw se sienten vulnerables por la pérdida del control sobre cómo se representa su cultura y territorio. Las decisiones impuestas por actores externos, como agencias de turismo o gobiernos, sin la debida consulta y consentimiento de la comunidad, ha generado tensiones y conflictos.

Consideran que el turismo puede traer consigo impactos negativos en el entorno natural, como la contaminación, la sobreexplotación de recursos y la perturbación de la fauna y flora local y esto está afectando su estilo de vida.

Por último, se encuentra el pueblo Nukak. Los Nukak son uno de los últimos pueblos nómadas de la Amazonía colombiana, con una cultura y modo de vida profundamente ligados a la selva. Han enfrentado numerosos desafíos debido al contacto con el mundo exterior, incluidos desplazamientos forzados, enfermedades, y presiones sobre su territorio. La tradición de los pueblos Nukak se está perdiendo, lo que los ha llevado a ir al pueblo a vender artesanías.

Se debe tener en cuenta que el turismo en el Resguardo Nukak no es posible a causa de la situación de seguridad, así como las razones ambientales. Además no hay ningún esfuerzo por parte de los Nukak para hacerlo, pues no corresponde a su estilo de vida. Por su actual modo de vida seminómada, no fue posible establecer contacto personal con los representantes de esta comunidad. Toda la información proviene del antropólogo Julián de la ONU (Julian, comunicado personal, 29 de abril del 2021), (Kelly, comunicado personal, 21 de abril del 2021).

Los resguardos como lugares conflictivos del etnoturismo

Los resguardos indígenas son territorios legalmente reconocidos y protegidos en varios países de América Latina, donde viven comunidades indígenas. Estos territorios tienen un estatus especial que les permite a las comunidades indígenas ejercer autonomía y control sobre sus tierras y recursos naturales, de acuerdo con sus usos y costumbres tradicionales.

Se puede decir que en el Guaviare se observa como en algunos resguardos se está desarrollando un turismo. Hoy es claro que el turismo promueve prácticas nocivas para el ambiente y para las comunidades que habitan esos espacios.

El turismo "perfecto", tal y como lo describe Kelly de Parques Nacionales (Kelly, comunicado personal, 21 de abril del 2021), sería un turismo que proteja tanto el ambiente como la cultura indígena y su gente de forma sostenible, debe ser creado en cooperación entre los representantes indígenas, el Estado y los representantes culturales. Sin embargo, Kelly describe que lo que ocurre en el Guaviare es un turismo colonial de masas, exótico para los foráneos y sin organización

El capitán Gerardo del resguardo La María señala que los turistas entran en los resguardos sin pedir permiso y toman fotografías sin autorización. Para él y su comunidad, el agua se contamina,

llegan enfermedades y afecta a la vida cotidiana de los Jiw sin que los turistas se den cuenta. El capitán Gerardo no culpa al turismo de los problemas ambientales y culturales que enfrenta su comunidad, no lo ve como algo malo, considera que el turismo también aporta recursos, afirma que debe estar bien organizado y solo puede tener lugar bajo ciertas condiciones. Crítica a otros resguardos y su relación con el turismo como fuente de pérdida cultural y occidentalización; culpa a los establecimientos y a las agencias de un turismo negativo.

El capitán Francisco Castañeda del resguardo El Barrancón coincide en gran medida con la posición del capitán Gerardo, este ratifica: "nos gustaría que los turistas pudieran conocer a los artesanos con sus propios ojos y así tener más información y conexión con los productos, pero si el turismo está mal organizado, puede tener graves consecuencias" (Francisco Castañeda, comunicado personal, 21 de mayo del 2021).

Kaide Mejía, miembro del resguardo indígena de Panuré (Kaide Mejía, comunicado personal, 21 de abril del 2021), destaca que no hay un gran desinterés por las tradiciones ancestrales, sobre todo en las generaciones más jóvenes del resguardo, puesto que el cambio de vida, de hábitos, así como el consumo y el turismo en los últimos años ha provocado un fuerte cambio en su comunidad. Kaide mencionó que el contacto frecuente con los turistas occidentales está llevando a que las generaciones más jóvenes no quieran aprender la lengua tradicional y prefieran formar parte de la sociedad occidental en lugar de la indígena.

Panuré, es un resguardo que está haciendo absorbido por el casco urbano de San José, lo cual ha llevado a su comunidad a explorar en la oferta de artesanías y servicios turísticos, gracias a su proximidad al centro y al aeropuerto. En este resguardo la comunidad tiene la oportunidad de gestionar su propio negocio de artesanías, ellos son conscientes que reciben más visitas turísticas que los demás resguardos por esta cercanía.

Cristián Muñoz, operador de la tienda de artesanía en el resguardo, dice que "la cooperación de Miguel Ángel Holguín⁴ nos ayudó a organizar veladas y actividades turísticas. [...] Las anteriores veladas fueron un gran éxito y con la ayuda de Instagram y una colaboración con Caracol Televisión llegaron muchos turistas" (Cristian Muñoz, comunicado personal 2 de mayo del 2021). Se debe tener en cuenta que acceder a este tipo de turismo requiere un acercamiento previo, porque las comunidades deben organizar sus espacios y tiempos para poder ofrecer los diferentes servicios que poseen. De esta manera, para visitar el resguardo y poder probar la chicha o el pescado moqueado, se debe avisar con al menos dos días de antelación.

Por las palabras de Muñoz, se observa que el turismo en Panuré está mejor organizado, posiblemente por su ubicación próxima a la capital y el acceso a la tecnología. Es una comunidad que cuenta con una organización interna que les permite recibir grandes grupos de turistas en su resguardo.

En el caso del resguardo El Refugio, por las narraciones de la capitana Johanna, hay grandes aspiraciones sobre el turismo. Por ejemplo, la comunidad quiere desarrollar una ruta turística al

⁴ un miembro fallecido de la comunidad que fundó la cooperación para apoyar el turismo en el resguardo.

resguardo; ya cuentan con un paquete para los turistas que incluye la visita a las chagras, la experiencia de la pesca y otras actividades, además de las danzas y la gastronomía. Johanna comentó "el objetivo es organizar las actividades aún mejor, tal vez incluso un paquete de dos-tres días con experiencias de medicina tradicional" (Jhonna, comunicado personal 26 de abril del 2021).

Su objetivo como nueva capitana es el de fomentar el turismo como una nueva forma de obtener recursos económicos, realizando actividades que les permitan continuar con sus quehaceres cotidianos. También, la creación de experiencias turísticas les permitiría generar espacios para la conservación de su cultura por medio del arte, ya sea en forma de artesanías, presentaciones de danzas tradicionales o espacios para relatos e historias de su cosmovisión.

En La Fuga (Girardo y Misael, comunicado personal 3 de mayo del 2021) e Itilla (Reunión 2) les agrada que vayan turistas, sin embargo, la falta de una infraestructura vial, lo que se traduce en un largo y extenuante viaje desde San José (lugar del que parten los turistas), imposibilita o limita las visitas que puedan recibir.

Se observa que desde la gobernación del departamento y las alcaldías locales sigue faltando interés, coordinación y organización de las actividades étnicas y turísticas, así como atención a las necesidades básicas de las comunidades.

Un mapeo social en Itilla lo confirma. Cuando se les preguntó a los miembros de la comunidad cómo ven su resguardo en la actualidad y en el futuro, estos mencionaron que requieren una mejor infraestructura. Desde la comunidad hay deseos de una mejor comunicación con las demás zonas del país. Se mencionan mejoras en el acceso a su resguardo, las cuales se plasman en sus dibujos, muchos de los habitantes del resguardo diseñan y dibujan puentes sobre el río cercano, una segunda maloca solo para los huéspedes y, en general, una mejora estructural en las casas y las calles. Además, queda claro la aspiración de una mayor frecuencia de turistas, como se muestra en la Figura 3 sobre la visión presente y la visión a futuro.

Desde las organizaciones, el presidente de la Asociación de Autoridades Tradicionales Indígenas, que representa a las comunidades Tucano Orientales, José Antonio Méndez, describe otra cara del turismo "el turista tiene ciertas expectativas, además, solo se le debe mostrar lo más bello de las comunidades y de la cultura, la visión para los turistas es muy selectiva y limitada" (Jose Mendez, comunicado personal 21 de abril del 2021). José también menciona que cuando los turistas salen de estas actividades y ven la vida real se sienten decepcionados, y aunque para él el impacto económico del turismo ha sido muy positivo, este debería estar mejor organizado, pero no hay acuerdos entre las comunidades sobre cuál sería la mejor manera de hacerlo. Adicionalmente, la misión principal de la asociación es mejorar la calidad de vida de sus comunidades, intentan hacer más visible el etnoturismo y liberarse de la dependencia de las agencias turísticas para actuar con más libertad, autodeterminación y obtener los beneficios que están siendo redirigidos a las agencias turísticas que prestan el servicio.

Por otra parte, la comunicación de las comunidades indígenas con la alcaldía y la gobernación resulta particularmente difícil, debido a que no hay un apoyo significativo del Estado en las gestiones turísticas (CristiCristián y Francisco Castañeda, comunicado

Figura 3 - Mapa de localización área de estudio



Fuente: reunión con grupos focales comunidad Itilla, 2021

personal 2 de mayo del 2021) y parece ser difícil establecer contacto con ellos y organizar una reunión (Gerardo, Comunidad Itilla, Johanna, comunicado personal 28 de abril del 2021).

El contacto con las agencias turísticas también resulta bastante complicado o las comunidades quieren tener contacto, pero no hay conexión (Francisco Castañeda, comunicado personal 2 de mayo del 2021) o bien les gustaría operar sin agencias, pero no tienen los recursos, como pasa en Panuré. Solo El Refugio coopera con una agencia turística que les prescribe las tarifas, pero al mismo tiempo garantiza la afluencia turística (Miguel, comunicado personal 2 de mayo del 2021).
Varios vendedores comentaron que

las agencias turísticas tienen a los turistas en un horario fijo y esto solo incluye las visitas preestablecidas a los resguardos, pero no deja espacio para otras visitas o actividades [...] y [...] muchos turistas visitan Panuré y apenas tienen interacción con el resto de las comunidades (Patricia y Flavia comunicado personal 21 de abril del 2021).

lo anterior evidencia una captación de las y los turistas lo cual no favorece a ningún miembro de la comunidad que no forme parte de las dinámicas de las empresas turísticas.

Representantes del gobierno local manifiestan la intención y los intentos de apoyar a las comunidades en relación con el turismo, afirman que no es fácil y que están formulando un plan. En la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Norte y el Oriente Amazónico (CDA), John Moreno afirmó “tenemos iniciativas más pequeñas para ayudar a las comunidades más cercanas, pero no son prioritarias, ya que la CDA se ocupa principalmente de investigar el problema de la deforestación” (Jhon Moreno, comunicado personal 26 de abril del 2021).

Por otro lado, Hugo Sánchez (Hugo Sánchez, comunicado personal Chugo abril del 2021), de la Secretaría de Turismo, describe que la intención es establecer un etnoturismo justo en el que las comunidades sean lo primero, y que no se convierta en un producto de masas que ponga en riesgo la cultura de las comunidades. Aunque es consciente de que existen visiones del mundo muy diferentes que no permiten que se establezcan los canales de comunicación necesarios para la creación y el fortalecimiento de un turismo indígena que no busque atraer masas, sino que sea un turismo pensando con cuidado y mucho respeto por la naturaleza y las comunidades visitadas.

Benjamín (Benjamin, comunicado personal 25 de abril del 2021), el contacto indígena estatal de la alcaldía, también destaca que hay un gran potencial en las comunidades, pero que no hay inversión de

manera adecuada ni buen manejo, afirma que “el Estado persigue principalmente políticas asistencialistas en lugar de educativas”. Es más, por el lado de las comunidades indígenas hay deseos y exigencias poco realistas, lo que desilusiona y decepciona a ambas partes. Benjamín expone que los pueblos indígenas reaccionan de forma muy sobreprotectora en muchas cosas, sobre todo en temas que involucran su cultura. Muchos de ellos tienen claridad de la influencia de los “blancos”, por lo cual se generan disputas entre los diferentes resguardos, así como entre resguardos y “blancos” por ejemplo, con la propiedad y los límites entre Jiw y Nukak.

La comercialización de los sitios sagrados

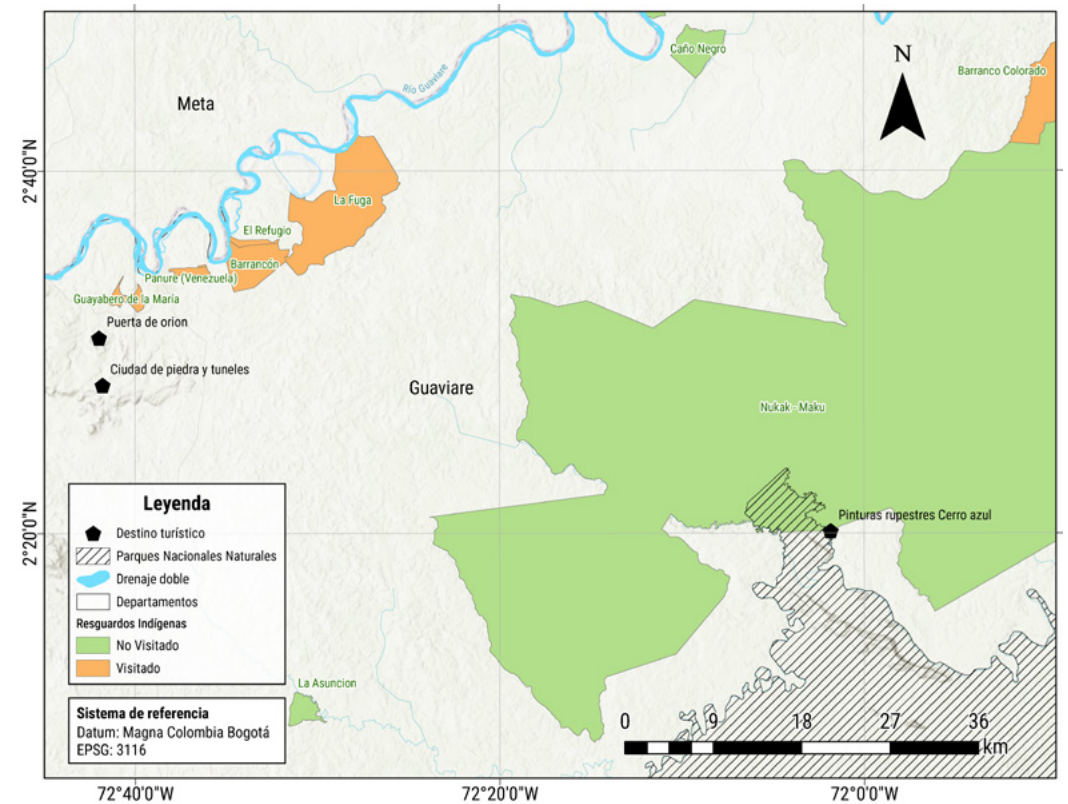
En el Guaviare se encuentran sitios sagrados que a su vez son sitios turísticos —representados como pentágonos negros en la Figura 4—, algunos de ellos son: las pinturas rupestres de Cerro Azul, Nuevo Tolima y El Raudal; así como las formaciones rocosas sagradas de Túneles, Ciudad de Piedra y Puerta de Orión. Las anteriores han iniciado un proceso de comercialización por parte de un turismo no regularizado que nace desde la firma de los Acuerdos de Paz. A raíz de esta firma los actuales dueños de los predios cobran una entrada para visitarlos, aunque, estos espacios que han sido sometidos a una comercialización no cuentan con señalización, protocolos de emergencia ni demás

elementos que requieren la prestación de un servicio turístico registrado, y adicionalmente, desplazan a las comunidades originarias que hoy en día han perdido el acceso a estos terrenos.

Tanto la capitana Johanna (Johanna, comunicado personal 26 de abril del 2021), como Cristian Muñoz (Cristian Muñoz, comunicado personal 2 de mayo del 2021) y los guías locales del Raudal y Cerro Azul nos confirman que las comunidades indígenas solían vivir y visitar estos sitios hace mucho tiempo, pero hoy, dichos lugares no tienen prácticamente nada que ver con los indígenas y su cultura. Tanto la tierra como las actividades turísticas están en manos de colonos y, aunque algunos proyectos quisieran contratar a guías indígenas, todavía no se ha desarrollado nada en este sentido.

Cerro Azul es el único lugar que mantiene vínculos con los Tucano Orientales de Panuré, porque un miembro de la comunidad trabaja realizando guías, relatando historias y ofreciendo su conocimiento para la lectura de los pictogramas que se encuentra en el tepuy. A diferencia de los otros lugares, aquí también se han celebrado ceremonias en los últimos años, pero de comunidades que no son originarias del Guaviare (Victor Diaz, comunicado personal 2 de mayo del 2021). En general, puede decirse que la comercialización de estos lugares ha llevado a una separación de estas de las comunidades y que estas no tienen hoy en día ni acceso a ellos ni un papel significativo en su comercialización.

Figura 4 - Sitios turísticos y sagrados para comunidades indígenas del Guaviare



Representaciones indígenas en el casco urbano

El casco urbano de San José del Guaviare es un lugar estratégico para cada uno de los habitantes del Guaviare, ya que es un espacio con alta presencia de comercio y con alto tránsito de personas, sin embargo, para muchos pueblos indígenas, la ciudad se construyó históricamente como un espacio de exclusión y dominación que los relegó a los confines de la modernidad (Sepúlveda y Zúñiga, 2015). San José es muy transitado por las comunidades indígenas, que principalmente venden sus artesanías y productos gastronómicos como la faraña, lo que lo convierte en un lugar de flujos, donde se vincula territorialismo (en el control de áreas) y capitalismo en la valorización redes y circulación, por tanto, se presenta una dicotomía entre lo funcional y lo simbólico (Haesbert, 2013).

Los indígenas fueron los primeros habitantes de este territorio. “El centro de cultura tiene una importancia a nivel histórico, pues es el lugar al que llegaban las comunidades [...] Los árboles son sagrados”, así lo expresa Hugo Sánchez (Hugo Sanchez, comunicado personal 21 de abril del 2021). Sin embargo, hoy en día las comunidades indígenas se encuentran en condiciones de mendicidad, especialmente miembros de los pueblos Nukak y Jiw.

Frente a esto Felipe, encargado de planeación municipal, menciona:

en el parque central llegaban indígenas a pernoctar principalmente Nukak y vendían artesanías [...]. En el centro urbano hay miembros de los Nukak como miembros de los guajiros y algunos Jiw haciendo recorridos por acá y como lo llama el turista o el colono mendigando y robando comida. Ese es uno de los impactos que es visual, que se ve ahí al instante (Felipe, comunicado personal 19 de abril del 2021)

La mayoría de los actores con los que logramos hablar expresaron opiniones con respecto a la mendicidad de las comunidades indígenas. Flavia, vendedora de artesanías y bibliotecaria, mencionó:

los Nukak no piden y no están por las calles. El problema son los Jiw, sin embargo, siempre se habla mal de los Nukak. [...] Los niños piden y piden, los niños de Jiw son groserísimos. Si uno les da una libra de frijoles, lo venden porque no es la comida de ellos (Flavia, comunicado personal 21 abril del 2021).

Ahora bien, no está muy claro qué comunidades son las que se encuentran en estado de mendicidad en el centro urbano, según nuestra observación las que predominan son las comunidades Jiw y Nukak.

Las comunidades Tucano buscan salvedad de la información que se difunde. En nuestra visita al resguardo La Fuga, los excapitanes Gerald y Misael mencionan: “en la radio dicen los indígenas nos están robando, pero no son los Tucano, a los Tucano casi no les llega recursos, les llega es a los Nukak” (Gildardo y Misael, comunicado personal 3 de mayo del 2021), manifestando que se debe hacer una diferenciación de las etnias a las que hace referencia la prensa para no mostrar a lo indígena como algo homogéneo, sino manifestar la diferencia y la multiculturalidad que caracteriza al departamento.

El Estado ha propuesto algunas estrategias para las comunidades que llegan al casco urbano “tienen una casa de paz, pero no se ve bienestar ni la policía y se ve los niños chupando bolsas”

(Flavia, comunicado personal 21 abril del 2021). Esa casa fue realizada como hogar de paso para pocas personas, pero muchas se quedaron allí, lo cual ha generado hacinamiento, el no disponer de un espacio, hace que algunos indígenas duerman en las calles (Kelly, comunicado personal, 21 de abril del 2021).

Estas condiciones, la mendicidad, dormir en la calle hace a las comunidades vulnerables, las niñas deben salir de los resguardos en busca de alternativas, sometiéndose a otras problemáticas como el consumo de drogas y la prostitución, condiciones que a su vez reflejan desarticulación desde los hogares y las familias y un rompimiento cultural en el que las tradiciones se encuentran en la cuerda floja.

Adicionalmente, “hay otros impactos como el desplazamiento, el cambio de comportamiento de los Nukak, la cacería, como están ingresando ellos a las fincas a robar plátanos y otros alimentos” (Felipe, comunicado personal 19 de abril del 2021). Por lo que las afectaciones que se han generado a las comunidades indígenas son innumerables, ya sean a causa de la occidentalización o meramente a causa del turismo. En el casco urbano se evidencian múltiples tensiones, ya que en él se congregan diversas poblaciones, sus voces y acciones, sumado a que podría entenderse como un espacio o lugar de flujos (Carrión, 2000).

Producción, comercialización y venta de artesanías ¿Nueva forma para el acceso monetario?

Luego de la firma del Acuerdo de Paz en 2016, el Guaviare ha visto la oportunidad de convertirse en un atractivo turístico que trasciende los imaginarios que existían sobre él. A raíz de lo anterior, sus habitantes han visto una oportunidad para emprender y llevar a cabo nuevas actividades asociadas al creciente turismo en la región.

Una de las actividades es la producción, venta y comercialización de artesanías, pueden ser vistas como objetos materiales que visibilizan elementos históricos y tradicionales de una cultura o un grupo en específico. Además, las artesanías reconocen y valoran el acervo cultural que como objetos poseen (Bermúdez Currea y Salazar Garcés, 2011). Cabe aclarar que estas artesanías corresponden a un amplio abanico de productos realizados por diferentes actores del departamento. En este caso en específico, se hablará de las artesanías producidas por los diferentes pueblos indígenas presentes en el departamento del Guaviare, las cuales, en su gran mayoría, son comercializadas por personas ajenas a dichas comunidades.

Tiendas administradas por miembros no indígenas

San José del Guaviare posee una amplia variedad de tiendas que comercializan artesanías indígenas. La Figura 5 muestra las diferentes tiendas. Se pueden encontrar tiendas de artesanías atendidas por indígenas y no indígenas, no todas las tiendas representadas producen las artesanías que venden, la gran mayoría de los dueños manifestaron que adquieren las artesanías de forma esporádica y sin ningún tipo de control con productores indígenas. Manifestaron que los miembros de los diferentes pueblos indígenas no producen artesanías de forma continua y bajo los mismos parámetros. Muchos de los artesanos trabajan en poca cantidad y lo venden a bajos precios. Esta situación es de conocimiento público y permite que

los dueños de las tiendas adquieran productos a bajos precios y los comercialicen a precios más elevados. Entre las tiendas visitadas resalta una de ellas: el Fondo Mixto de Cultura, manejada por funcionarios de la Gobernación del Guaviare, que, al igual que las otras tiendas, no ofrece ningún tipo de estabilidad a los artesanos. De la misma manera que los demás dueños, esta tienda compra las artesanías para luego revenderlas a los turistas

Los dueños de las tiendas no compensan los artesanos por su trabajo, según ellos, actúan honestamente y no ven el problema de aumentar el precio de productos, hasta un 200%. Esto genera un mercado desigual que desfavorece a los indígenas artesanos, que no tienen visibilidad y ayudas estéticas, mientras que los dueños de las tiendas en el casco urbano son altamente representados, como lo muestra la Figura 6.

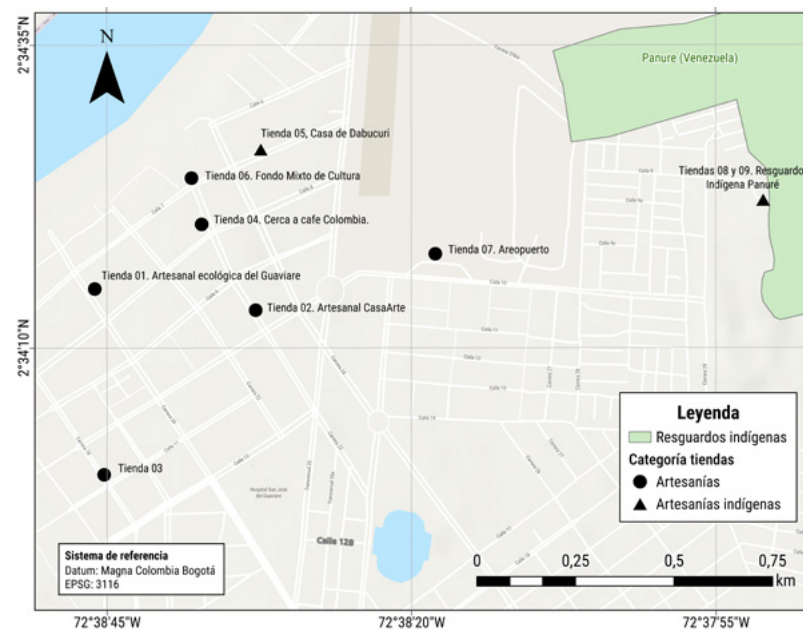


Figura 5 - Tiendas de artesanías de San José del Guaviare



Figura 6 - Distribución de artesanías en las diferentes tiendas del casco urbano

Fotografía de Ruiz, abril de 2021.

La distribución de las artesanías a los visitantes, turistas y otros clientes se muestra en la Figura 5. Sin embargo, no solo eso se observa, sino que también se puede ver la distribución de los productos y su relevancia dentro de sus locales. Es importante destacar que estos negocios también venden otros tipos de artesanías hechas por miembros de la comunidad “blanca”. A pesar de que los productos sean elaborados por pueblos indígenas, los productos que pertenecen a los artesanos indígenas son los que más resaltan o les dan mayor prioridad. Las imágenes también ayudan a ilustrar cómo se representa al indígena. Las dos primeras fotografías, en particular, muestran elementos que se consideran “típicos”.

También, es importante reconocer que en la mayoría de los establecimientos se hace el trabajo de sensibilización con respecto al origen de los materiales y la comunidad que fabricó la artesanía. De esta forma, los turistas o clientes tienen claridad con relación al artesano o artesana que produjo los objetos que están comprando. Esto ayuda a las comunidades indígenas en la medida que permite eliminar la imagen homogénea que los inscribe a todos bajo la misma imagen. Además, al hacer la aclaración de los materiales usados, su obtención y su diseñador(a), los turistas pueden entender que las comunidades se ubican en distintos territorios, que poseen diferentes cosmovisiones y formas de ver y habitar el mundo, a la vez que son conscientes de que hay diferentes formas de vivir a las que ellos poseen.

Existen diversas comunidades que poseen diferentes formas de producir y comercializar sus productos. En la esquina inferior derecha de la Figura 5, se puede observar un tipo específico de tejido y pigmentos; esta artesanía es desarrollada por miembros de la comunidad Nukak y comercializada en los diferentes establecimientos. Como mencionaron diferentes dueños y dueñas, las manillas suelen ser uno de los productos de mayor venta/consumo por parte de las y los turistas, quienes se acercan a sus establecimientos buscando dicha artesanía para usar o llevar como recuerdo. Dichas manillas solo son producidas por miembros de la comunidad Nukak y representan un tipo especial de narración de su cotidianidad. Ninguna otra comunidad replica este estilo y respeta su forma de elaborarlas.

Por otro lado, se observa que las tiendas que comercializan artesanías indígenas, pero que no las producen, tienden a tener una relación desigual con los artesanos indígenas, se le ve como un miembro secundario del casco urbano. La mayoría de los dueños de tiendas no poseen un contacto fijo con los artesanos, por lo que no hay una comercialización estable entre los dueños de tiendas y artesanos.

Las artesanías indígenas que se venden en tiendas no indígenas carecen de una conexión o relación, ya que cada tienda responde a sus propios intereses y no busca un objetivo de grupo. Este abandono de las comunidades indígenas, que deberían vender sus productos de manera informal, conduce a precios bajos y al menosprecio de la dignidad de los artesanos.

Este modelo de producción y comercialización en San José del Guaviare afecta a los artesanos indígenas, ya que los dueños, intermediarios y turistas pagan precios que no garantizan la compensación por un trabajo digno, no generan estabilidad o beneficio justo.

Tiendas administradas por miembros indígenas

En el casco urbano se pudo localizar algunos establecimientos administrados por indígenas (véase Figura 4). Las tiendas ubicadas en el Resguardo Panurú y una en cercanías del parque central del municipio pertenecen a miembros de las comunidades Tucano Orientales (Figura 7); los miembros de esta comunidad, en palabras de todas las personas entrevistadas, son los que poseen una mejor organización y coordinación entre ellos, con los turistas y colonos en temas relacionados con el turismo y la comercialización de sus productos típicos, entre ellos las artesanías.

Dos de las tres tiendas funcionan bajo la modalidad de tiendas comunitarias, las cuales forman parte de una asociación entre diferentes artesanos de la comunidad Tucano Oriental. En el caso de la tercera tienda, esta pertenece a una sola persona, una mujer que reside dentro del Resguardo Panurú y que trabaja de forma individual sus artesanías. Estas tiendas tienen el apoyo de toda la comunidad y con ellas buscan dar a conocer las artesanías que por generaciones han realizado. Además, su principal objetivo es el de formalizar su trabajo como artesanos y obtener un ingreso económico justo por su trabajo.

En cada tienda comunitaria se puede observar que existe un fuerte deseo por exaltar y reconocer el trabajo de cada artesana y cada artesano. Por lo que cada producto posee una marquilla que contiene el nombre, material y comunidad a la que pertenece. En la Figura 6b se puede apreciar la etiqueta de color naranja de la que se está haciendo mención.

En la Figura 7 se observa la organización de las artesanías y la variedad de materiales, colores, texturas, formas y símbolos representados en cada una de ellas. Esta disposición de las artesanías invita a las personas a detallar cada artículo sin pasar por alto el anterior. De igual forma, estas tiendas tratan de resaltar el trabajo

de todas las personas, para ello mantienen una distribución de los productos que garantice que todas las artesanías tengan visibilidad. Además, a diferencia de las otras tiendas de artesanías turísticas, estas no hacen uso de imágenes u otros elementos para la decoración de sus espacios —plumas o imágenes de la selva—. Estas tiendas se construyen desde el respeto y la configuración de una idea de diversidad. Acá no se pretende reforzar los imaginarios y estereotipos que existen sobre ellos como comunidades indígenas, por el contrario, estos espacios buscan construir una imagen actual y cargada de sus símbolos y experiencias.

Por otra parte, se pudo constatar por medio de las entrevistas con los vendedores administradores de estos espacios que no existe una ayuda o acompañamiento constante por parte de los actores institucionales. Esto ha causado que estos espacios no cuenten con la visibilidad que se desearía. No hay una ayuda para publicitar o atraer potenciales clientes que deseen visitar y adquirir productos en estas tiendas.

En las entrevistas realizadas a diferentes actores institucionales y encargados del sector de cultura y patrimonio, se reconoce el abandono por parte de estas instituciones que no tienen como prioridad el fortalecimiento de las actividades turísticas y culturales que están tratando de promover las diferentes comunidades indígenas.

Ahora bien, en la tienda del Resguardo Panurú, pero que no entra en las lógicas de un trabajo comunitario, se pudo observar que, incluso en su visión individual del trabajo con las artesanías, existe un respeto por los diseños y los productos que se fabrican y comercializan. Es importante recalcar que el trabajo desarrollado en esta tienda no busca opacar o imitar lo realizado por otras artesanas y artesanos; su trabajo y comercialización respetan lo acordado dentro del resguardo. Su dueña manifiesta que no forma parte de la tienda comunitaria por motivos personales, pero que valora el trabajo realizado desde la comunidad e invita a las personas a visitar ambos lugares (Entrevista 22). Asimismo, su establecimiento comercializa artesanías de origen Nukak, provenientes de una amiga a quien le colabora. En su caso, y muy a diferencia de lo realizado por las personas de los otros locales, su interés por comercializar este tipo de artesanías se limita a ayudar a su amiga, ya que todos los ingresos que obtiene van dirigidos a dicha artesana. Ella no compra para revender, de hecho, ella no le compra, solo los ofrece y las ganancias obtenidas por la venta de sus artesanías van a dicha persona. Acá se evidencia un ejemplo de trabajo en equipo, un trabajo que construye lazos entre las diferentes comunidades. De igual forma, se ve cómo la visión comercial y personal juega un papel importante en la manera de proceder. En su caso se resalta el deseo por colaborar y ayudar, mientras que en otros escenarios visitados se observó que no prima una lógica de este estilo, al contrario, prima un deseo económico que rompe con cualquier deseo de ayudar.

Volviendo a las tiendas de origen comunitario, también se observó que existe un respeto por el trabajo y el valor que cada artesana y cada artesano pone a su trabajo. En estas tiendas no existe un valor unificado para las artesanías; cada persona determina el valor que quiere cobrar por su artesanía. Las personas que trabajan en las tiendas ofrecen estos productos y llevan un registro de lo vendido, por lo que el dinero obtenido va para cada artesana y artesano. Con respecto a este modelo de ventas, las personas encargadas de administrar los locales comentaron

que la comunidad está de acuerdo, ya que permite dignificar su trabajo y establecer precios justos que se adecuen al costo de los materiales usados y la cantidad de tiempo y esfuerzo invertido por cada artesana o artesano. Así, el turista puede entender que la construcción de cada pieza requiere un esfuerzo que en muchas ocasiones no es valorado o se pasa por alto. Este modelo permite que las y los artesanos se apropien de su trabajo y puedan obtener un recurso que iguale al trabajo que realizaron.

Por otro lado, un elemento a tener en cuenta y que conecta a las diferentes comunidades indígenas es el acceso a las materias primas con las que producen sus artesanías. Con respecto a este tema, las personas entrevistadas, que pertenecen a alguna comunidad indígena, están de acuerdo con que sus resguardos no cuentan con todos los elementos necesarios para la fabricación de artesanías, por lo cual deben recurrir a sitios más retirados para poder acceder a estos. A raíz de esto, se pudo notar que entre más cerca se encuentren del casco urbano, más dificultades existen; esto se debe a que cada vez pierden más territorio frente a la “gente blanca” que los encierra y limita en su forma de vivir y habitar el espacio. Sin embargo, lo anterior ha permitido que se establezcan lazos y relaciones entre miembros de diferentes comunidades, así los indígenas Jiw proveen de materiales a los Tucano Orientales que viven en resguardos más próximos al casco urbano.

Es importante recalcar que estos espacios —tiendas— están diseñados para la comercialización de artesanías de origen indígena. A diferencia de las otras tiendas de artesanías, estas no promocionan otro tipo de artesanías que no sean diseñadas y producidas por las y los artesanos indígenas. Lo cual se puede entender, ya que estos objetos visibilizan elementos históricos y tradicionales que tienen una carga simbólica y sustancial que no poseen las artesanías que producen otros actores. Además, se debe recordar que las artesanías reconocen no solo un sentido de pertenencia, sino también un legado que se plasma en su trabajo y no en el ejercicio de revender un objeto. Para ellos el diseño, la fabricación y la venta de artesanías representa un medio de obtener dinero, pero también es un medio para perdurar sus creencias, una de sus formas de hacer arte y su cultura. Por eso es de vital importancia que desde la institucionalidad se haga un esfuerzo por ayudar a los establecimientos que nacen desde el trabajo en equipo, desde la organización y la asociatividad de las diferentes personas y miembros de las diferentes comunidades indígenas.

Finalmente, y conectado a lo anterior, está el papel que deben jugar las instituciones y los demás miembros de la comunidad, ya sea en forma de turistas nacionales o extranjeros o personas locales. Estas deben comprometerse a ayudar y a fortalecer estas iniciativas y no permitir que fracasen o se terminen por falta de visibilidad o apoyo. Con respecto a esto último, se evidencia en lo comentado por los actores indígenas, quienes relatan que el apoyo estatal muestra una desconexión y un desinterés por su cosmovisión, por su forma de vivir y la forma en que quieren desarrollar sus actividades económicas.

En este orden de ideas, en el caso de las artesanías los pueblos indígenas si las ven como un medio para generar recursos de una manera digna y que a su vez favorezca los procesos turísticos que está desarrollando el municipio, de esta manera tanto las comunidades indígenas como los otros habitantes del municipio y el departamento pueden beneficiarse de este sector en crecimiento

Figura 7 - Artesanías comercializadas en las tiendas indígenas

Nota: a) y b) artesanías de La casa del Dacuburí, y c) artesanías comercializadas en la tienda comunal del Resguardo Indígena Panurú.

Fotografía de Ruiz, abril de 2021.



y fortalecer a todos los implicados. No obstante, para pensar en un escenario que apoye a las comunidades, que fomente relaciones más justas y dignas para las y los artesanos, así como que visibilice y acompañe a todas las tiendas, requiere de un trabajo que debe ir encabezado por las instituciones municipales, departamentales y nacionales quienes deben ofrecer todos los recursos y herramientas a su disposición para diversificar y mejorar las ofertas actuales con relación a las tiendas que ofrecen artesanías indígenas.

Imágenes y representaciones indígenas y de lo indígena

A lo largo y ancho del territorio del Guaviare, principalmente en el área urbana, se encuentran diferentes muestras artísticas y culturales que hacen referencia a las comunidades indígenas presentes en el departamento. Si bien el Guaviare es un departamento multicultural, como lo mencionamos anteriormente, el Estado no tiene políticas certeras que ayuden a los pueblos indígenas que se ubican en esta área, por lo que las comunidades muchas veces no cuentan con servicios básicos para subsistir. Sin embargo, es frecuente encontrar que se vende la imagen de lo indígena.

Muestras artísticas

Una de las formas mediante las cuales se vende mayormente la imagen y representación de lo indígena en San José del Guaviare son las muestras artísticas, las cuales se abordan en esta categoría haciendo referencia a pinturas y murales. Estas representaciones plasman la imagen mayormente difundida de cómo se ve una persona indígena o, en el caso de los murales y las pinturas, se hace alusión a los pictogramas presentes en el Guaviare (Figura 8).

Los pictogramas son muestras artísticas y culturales de comunidades pasadas, lo que hace referencia a que estas pinturas no se siguen plasmando ni son parte de la tradición oral de todas las comunidades del Guaviare. Pese a, comunidades como la Jiw cuentan que en estas pinturas hay toda una serie de simbolismos de la mano de su cosmovisión y deben ser tratadas como algo sagrado, no obstante, estas pinturas son usadas como atractivo turístico y las comunidades indígenas ya no las pueden visitar.

En el centro poblado de San José del Guaviare se hace alusión a los pictogramas mediante diversas representaciones ya sean en artesanías (Figura 9) o murales (Figura 10), las cuales son realizadas por personas no indígenas, lo que refleja una apropiación cultural, esta ha sido definida como “el acto de usar o tomar cosas de una cultura que no es propia, en especial si no se entiende o respeta a tal cultura” (CNN Español, 2021). Por lo que mediante estas representaciones se evidencia el poco acceso que hay para las comunidades indígenas de visitar sus representaciones sagradas tradicionales y la difusión que hay de estas representaciones a los turistas, no solo desde la visita a sitios sagrados, sino también desde la venta y comercialización de objetos con simbolismos alusivos a tales representaciones.

Por el lado de la imagen de “cómo se ve una persona indígena” las representaciones de rostros de miembros de las comunidades son frecuentes en el centro poblado (Figura 10) y en sitios turísticos (Figura 11). En el trabajo de campo no se tomaron fotos directamente a las personas indígenas por respeto, pero desde la observación realizada y en contraste con los murales que fueron observados, no es frecuente que estas personas se encuentren con la cara pintada, como lo representa la Figura 10. Ahora bien, en la Figura 11 también

es clave en cuanto al impacto del conflicto armado, evidenciando que este afecta y ha afectado también a las comunidades indígenas. Las imágenes de lo indígena también han sido usadas en la toponimia desde un ámbito turístico. Esto se evidencia sobre todo en

servicios de hotelería y restaurantes. En este tipo de establecimiento se hace alusión a lo indígena desde la simbología y el nombre que se usa en los establecimientos.

Figura 10 - Pinturas de indígenas



Fotografía de Arbeláez, abril de 2021.

Figura 8 - Pinturas tipo pictogramas en San José del Guaviare



Fotografía de Ruiz, abril de 2021.

Figura 9 - Pinturas rupestres Cerro Azul



Fotografía de Ruiz, abril de 2021.

Figura 11 - Pintura indígena, conflicto armado.



En lo que respecta a hotelería, se evidencia uso de la imagen indígena en decoraciones (Figura 12), pero, también se evidencian términos referentes a celebraciones de origen indígena, como lo es el caso del hotel Yuruparí (Figura 12). Yuruparí, según menciona Estela Rico, era una celebración que congregaba a todas las etnias "Era únicamente indígena y fue reemplazado por el Yuruparí que es llanero y meten lo indígena a lo último y los indígenas están molestos porque no están resaltando las etnias" (Entrevista 7). Esto evidencia que se cambió totalmente una celebración con la llegada de los colonos, pero se conservó y difundió el nombre. Ahora bien, el Yuruparí es una celebración indígena que realizan etnias de Brasil y Colombia, y es tan antiguo que hasta en los pictogramas del Raudal se encuentran representaciones que aluden al mismo. Incluso hay lugares de Colombia en que se sigue practicando el Yuruparí de manera tradicional, pero es evidente que hay un desconocimiento en San José del Guaviare sobre el significado de este.

En lo que respecta a la imagen indígena en la industria gastronómica, es frecuente encontrar establecimientos enfocados a las bebidas y restaurantes de comidas rápidas. En el caso de Tribu, Terraza Food (Figura 13a), la alusión que se hace a lo indígena se puede ver en las representaciones que acompañan las imágenes las cuales son similares a los pictogramas del Guaviare, y también

se reflejan en el nombre del establecimiento, donde Tribu según la RAE (2021) significa "cada uno de los grupos de origen familiar que existían en algunos pueblos antiguos", en este caso hace referencia a los pueblos originarios del Guaviare. Por su parte, en la Figura 13b se usa la imagen directa de la persona indígena en la representación publicitaria y es curioso ver cómo se habla de "cosecha salvaje". Ahora bien, en este tipo de establecimientos se comercializan principalmente bebidas (Amazónico) y comidas rápidas (Tribu), pero, en el caso de las comidas rápidas, y según la información que pudimos encontrar en los menús de este tipo de establecimientos no se incluye comida típica indígena, sino la común comida rápida que es frecuente encontrar en otros lugares.

Ahora bien, una representación más directa de las comunidades indígenas presentes en el Guaviare se da en el restaurante "Nómada, restaurante y café Nukak" (Figura 14), el cual usa la imagen indígena en su logo y marca, así como en toda su decoración, la cual va desde pictogramas a las pinturas de personas indígenas, aprovecha la imagen de una comunidad indígena que en la realidad se encuentra en graves condiciones por el impacto de la cultura occidental. Ante todas estas representaciones, no existe una regulación estatal y mucho menos una compensación a las comunidades de las cuales se toma la imagen o representación.

Figura 12 - Representaciones indígenas en hoteles



Nota: a la izquierda mural en el Hotel Nombre del hotel; a la derecha Hotel Yuruparí en San José del Guaviare.

Fotografía de Ruiz, abril de 2021.

Figura 13 - Representaciones indígenas en restaurantes



Nota: a) Tribu Terraza-Food; b) Tienda de bebidas Amazonico, cosecha salvaje.

Fotografía de Ruiz, abril de 2021.

Figura 14 - Restaurante Nómada



Nota: a la izquierda, el logo del restaurante y algunos diseños de la decoración; a la derecha, decoraciones usadas en el restaurante.

Fotografía de Ruiz, abril de 2021.

En contraste, se encuentran el restaurante Catumare (Figura 15), el cual es gestionado por mujeres indígenas y ofrece comida típica de la región, como el pescado moqueado y otros platos que son más un tipo de comida fusión con preparaciones occidentales, como lo es el casabe con pescado moqueado (el casabe es un tipo de arepa que se realiza con yuca brava). Este plato tiene una imagen muy

similar a las crepes y no es una preparación que se encuentre con la misma presentación en otros lugares.

Catumare también ofrece jugos típicos de la región preparados con frutos con alto contenido de almidón. Además, la decoración del restaurante es con artesanías elaboradas por indígenas, lo que contrasta muy bien con la imagen que ofrece el establecimiento.

Figura 15 - Restaurante Catumare



Nota: a la izquierda, decoraciones con artesanías indígenas; a la derecha, platos típicos amazónicos.

Fotografía de Ruiz, abril de 2021.

Discusión

Se reconoce que el turismo en los resguardos del Guaviare aún tiene un largo camino por recorrer, es notable la diferencia en la valoración o aspiración de los diferentes actores, aunque todos podrían beneficiarse de un turismo sostenible, los diferentes actores son conscientes de que podrían beneficiarse de una organización centralizada en la que todos participen como iguales. Para lo

cual, se lograría una unidad entre todos los actores y una mejora en la presentación de la información y servicio para los turistas, por medio de una organización justa y centralizada de las visitas turísticas y de la venta de artesanías, así como una información más consciente y autóctona en el casco urbano y en los sitios sagrados/turísticos, podría armonizar las representaciones y las autorrepresentaciones y asegurar una imagen que beneficie no solo al turismo, sino también a las comunidades indígenas del Guaviare.

Se recalca que el turismo indígena o el etnoturismo en el departamento del Guaviare tiene un gran potencial, siempre y cuando se tenga en mente que los principales beneficiarios y facilitadores de esta actividad son los pueblos indígenas. Así mismo, se debe asegurar la certera comprensión y solvencia de las necesidades básicas de las mismas, lo cual incluye asegurar la infraestructura adecuada para el desempeño de actividades turísticas; propiciar un fortalecimiento de la transmisión oral, la cosmovisión y articulación dentro de las comunidades indígenas, y tener la certeza de que las comunidades que se vinculen con actividades turísticas tengan un entendimiento de lo que es el dinero.

Finalmente, se deben realizar mayores investigaciones sobre la identidad cultural y el impacto del turismo sobre comunidades indígenas, principalmente en Colombia, desde un punto de vista geográfico, especialmente desde ramas como la geografía del turismo, la geografía del consumo y la geografía cultural.

Conclusiones

Las comunidades indígenas del Guaviare han habitado este territorio desde tiempos inmemorables. Ha sido la sobreposición de diferentes actores en el territorio en diversos momentos históricos, con una concepción diferente del espacio que habitan lo que ha llevado a que el departamento se organice como lo hace el día de hoy, es decir con las nuevas dinámicas del turismo y un fuerte impacto al sobreponerse la cultura occidental y diferentes cosmovisiones indígenas. Los múltiples conflictos que ha tenido el Guaviare y relegar a lo indígena ha resultado en que los pueblos indígenas no cuenten con servicios básicos y que el enfoque étnico que tiene el departamento se quede corto al atender las problemáticas.

Es así como las representaciones de lo indígena se ven en diferentes lugares del Guaviare, sin embargo, el significado de estas representaciones queda en el olvido convirtiendo la imagen indígena en un elemento de consumo que promueve el comercio y la oferta principalmente del servicio gastronómico. En Guaviare existen tensiones en relación con las representaciones y autorrepresentaciones de lo indígena en lo que respecta al turismo. Esto se evidencia en el acceso nulo o limitado que tienen estas comunidades a los sitios turísticos/sagrados. De igual forma, se evidencian tensiones entre los diferentes pueblos indígenas, quienes se sienten afectados por la homogeneización e invisibilización de sus diferencias. Por otro lado, es importante reconocer que no todos y todas están de acuerdo con la entrada de actividades turísticas, ya que pueden poner en peligro sus concepciones del mundo y su forma de vivir y habitar los resguardos y territorios colectivos.

En cuanto a perspectivas turísticas, existe tensión entre los pueblos indígenas y las diferentes empresas turísticas; estas últimas se aprovechan de la falta de organización de las comunidades indígenas para desarrollar un turismo libre de intermediarios. En este orden de ideas, las diferentes culturas y tradiciones de los actores dificultan establecer una sana cooperación, ya que existen diversos temas o ideas sobre la organización, la implementación y los beneficiarios del turismo, a la vez que existen dificultades de contacto y cooperación entre los diferentes actores (Estatales y comunidades indígenas). Ejemplos de ello son: las dificultades de comunicación —la lengua—, cosmovisión, visión del turismo indígena o etnoturismo que quieren llevar a cabo, la distancia

geográfica, el impacto ambiental y el impacto social, lo cual se ve en sitios turísticos y tiendas. Asociado al último, se puede encontrar que los turistas carecen de un punto de contacto (físico) en el que puedan informarse sobre lo que deben y no deben hacer o cuales son las diferentes comunidades y resguardos. Por su parte, los agentes estatales intentan mejorar la cooperación, pero destacan que es difícil.

Algunas comunidades subrayan que miran al futuro con esperanza y ven en el turismo una importante fuente de ingresos una vez que esté mejor organizado, o quieren mantenerse al margen del turismo y preservar así su cultura y sus tradiciones de forma más pura. No obstante, es importante recalcar que se debe respetar el rechazo de algunas comunidades indígenas a vincularse al turismo, ya que no es un tema sencillo a causa de que hay un fuerte olvido estatal hacia las comunidades indígenas en el Guaviare. Los recursos y las políticas del departamento se encuentran enfocadas a combatir otras problemáticas como la deforestación, pero muchas veces se olvida que las problemáticas se conectan, por lo que una mayor atención a las comunidades indígenas no solo ayudaría a tener un turismo más equitativo, sino que permitiría generar soluciones más certeras a otras de las problemáticas que afectan al departamento.

Agradecimientos




Agradecemos a las personas del Guaviare, quienes se desempeñan en labores de guianza, ventas, trabajos humanitarios y servicios turísticos que nos colaboraron con sus palabras y sus opiniones. De igual manera, agradecemos a la Alcaldía, la Gobernación y demás instancias gubernamentales que nos proporcionaron información para el desarrollo de esta investigación. Finalmente, y con especial cariño, agradecemos a los pueblos indígenas que nos abrieron las puertas de sus hogares y nos permitieron conocer sus resguardos, sus opiniones, sus sentires. Todas las comunidades nos brindaron su hospitalidad, confianza y sabiduría. A todas ellas y a todos ellos les damos las gracias.

Referencias

- Agnew, J. y Oslender, U. (2010). Territorialidades superpuestas, soberanía en disputa: lecciones empíricas desde América Latina. *Tabula Rasa*, (13), 191-213. <https://doi.org/10.25058/20112742.409>
- Barreto, Margarita. (2005). Turismo étnico y tradiciones inventadas. En A. Santana Talavera y L. Prats Canals (Coords) *El encuentro del turismo con el patrimonio cultural: concepciones teóricas y modelos de aplicación* (pp. 1-19). Sevilla, Fundación el Monte/Federación de Asociaciones de Antropología del Estado Español/Asociación Andaluza de Antropología. <https://www.nacionmulticultural.unam.mx/empresasindigenas/docs/2236.pdf>
- Bermúdez Correa, C. y Salazar Garcés, M. G. (2011). Investigación sobre bagaje simbólico y cultural de las artesanías. *Artesanías de Colombia*. <https://repositorio.artesaniasdecolombia.com.co/bitstream/001/2564/3/INST-D%202011%2017.pdf>
- Carrión, F. (2000). Lugares o flujos centrales: los centros históricos urbanos <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/5jul>
- CNN Español. (29 de julio de 2021). Apropiación cultural: qué es y por qué es tan controversial. CNN. <https://cnnespanol.cnn.com/2021/07/29/apropiacion-cultural-que-es-y-por-que-es-tan-controversial/>
- Defensoría del Pueblo. (2023). Problemáticas de las comunidades indígenas en Guaviare. Informe Defensorial, enero 2023. <https://acortarlink.com/4ZJIW5>
- Del Cairo, C. (2011). Las jerarquías étnicas y la retórica del multiculturalismo estatal en San José del Guaviare. *Revista Colombiana de Antropología*, 47(2), 123-149. <https://doi.org/10.22380/2539472X.960>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2018). Censo Nacional de Población y Vivienda. <http://systema59.dane.gov.co/bincol/rpw-bengine.exe/PortalAction?lang=esp>
- Escobar, A. (2014). Sentipensar con la tierra: nuevas lecturas sobre desarrollo, territorio y diferencia. Universidad Autónoma Latinoamericana. http://biblioteca.clacso.edu.ar/Colombia/escpos-unaula/20170802050253/pdf_460.pdf
- Espejo-Moliner, P. y Pastor-Alfonso, M. J. (2017). Turismo indígena: concepto y características de una actividad en auge. En J. Gascón y C. Milano (Coords), *El turismo en el mundo rural ¿Ruina o consolidación de las sociedades campesinas e indígenas?* (pp. 39-55). Pasos Edita. <https://www.pasosonline.org/Publicados/pasosedita/PSEdita18.pdf>
- Gallego Acevedo, L. M. (2011). ¿Cultura para consumir? Los Yagua y el turismo cultural en el trapezico Amazónico. *Revista Colombiana de Antropología*, 47(1), 113-136. <https://doi.org/10.22380/2539472X.927>
- Gobierno Nacional y las Fuerzas Armadas Revolucionarias de Colombia-Ejército del Pueblo (2016). Acuerdo final para la terminación del conflicto y la construcción de una paz estable y duradera. <https://www.jep.gov.co/Normativa/Paginas/Acuerdo-Final.aspx>
- Gómez Manrique, D. L. (2018). *Representaciones, autorepresentaciones y negociaciones de la indianidad jiw* [Tesis de Doctorado en Ciencias Humanas y Sociales, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/64114>
- Gupta, A. y Ferguson J. (2008). Más allá de la cultura: espacio, identidad y las políticas de la diferencia. *Antípoda*, 7, 233-256.
- Haesbaert, R. (2013). Del mito de la desterritorialización a la multiterritorialidad. *Cultura y Representaciones Sociales*, 8(15), 9-42.
- Mansvelt, J. (2005). *Geographies of Consumption*. Sage.
- Mendoza, D. (24 de junio de 2022). Pueblos indígenas en riesgo de extinción en Colombia. IWGIA. <https://www.iwgia.org/es/noticias/4843-pueblos-indigenas-en-riesgo-de-extincion/C3%B3n-en-colombia.html>
- Morales González, M. (2008). ¿Etnoturismo o turismo indígena? *Teoría y Praxis*, 5, 123-136.
- Ochoa, G. (19 de octubre de 2018). Turismo de masas, una visita dañina para la Amazonia. *Periódico UNAL*. <https://periodico.unal.edu.co/articulos/turismo-de-masas-una-visita-danina-para-la-amazonia>
- Real Academia Española. Tribu. En *Diccionario de la lengua española*. Recuperado en 14 de mayo de 2022. <https://dle.rae.es/tribu>
- Sanabria Martínez, M. J. (2016). "Representaciones y autorrepresentaciones indígenas en los medios de comunicación masiva. *Cátedra Unesco. Humanidades digitales, diálogo de saberes y prácticas colaborativas en red* XXIII, 1-7. https://www.javeriana.edu.co/unesco/humanidadesDigitales/ponencias/pdf/TV_30.pdf
- Sepúlveda, B. y Zúñiga, P. (2015). Geografías indígenas urbanas: el caso mapuche en La Pintana, Santiago de Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, (62), 127-149. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022015000300008>
- Souza, N. N. S. de, Irving, M. de A., Souza, C. de M. y Lima, M. A. G. de. (2021). Turismo étnico indígena: definición conceptual, potencialidades y desafíos en Brasil. *Turismo: Visão e Ação*, 23(2): 308-28. <https://doi.org/10.14210/rtvav23n2p308-328>
- Vallejo, M. (2015). *La identidad cultural, el turismo y la recreación*. [Monografía de grado] Universidad Nacional de Mar del Plata. https://nulan.mdpedu.ar/id/eprint/1135/1/vallejo_m.pdf
- Villagrán Muñoz, C. (2016). De la Subalternidad a la autorrepresentación: las voces indígenas Latinoamericanas y el caso de las radiodifusiones Mapuche. *Versión Estudios de Comunicación y Política*, 37, 183-200.

Afectación del páramo desértico por la actividad turística en el Parque Nacional Sierra de la Culata, Mérida-Venezuela¹

Affectation of The Desert Paramo by Tourism Activity in Sierra de La Culata National Park, Mérida-Venezuela

Anairamiz Aranguren Becerra² 
Iris M. Díaz Fernández³ 
Elides Aquiles Sulbarán Zambrano⁴ 

Resumen

Se presenta el estado, valoración y conservación del ecosistema altiandino como consecuencia de la actividad turística y deportiva en un tramo de la ruta Mífafí-La Culata, Parque Nacional Sierra de La Culata en Mérida, Venezuela. Se hizo revisión bibliográfica, interpretación visual de las variables biofísicas usando imágenes de satélite, recopilación del número de visitas registradas. También, se hizo la estimación de los cambios en la cobertura vegetal mediante método de valoración directo en campo para medir el porcentaje de cobertura previo a la competencia deportiva (45k) en 20 parcelas de 4 m² distribuidas en un tramo de 12 km paralelos a la ruta. Los resultados muestran paso constante de personas en la ruta, ya que el ancho de la ruta varió entre 0,25 m a 9 m. El promedio de huellas entre 25 y 75 verifica que la cobertura vegetal sobre la ruta y próxima a ella está sometida a una constante perturbación y que cambios observados están relacionados con la competencia 45 k. Este mismo sendero, al ser el escenario de competencias deportivas, estas hacen que la vegetación y el suelo incrementen susceptibilidad. Se proponen medidas cónsonas con los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) para conservar este patrimonio natural de los venezolanos y de la alta montaña.

Palabras clave:

área protegida, ODS, páramo altiandino, parque nacional, turismo.

Cómo citar

Aranguren Becerra, A., Díaz Fernández, I. M. y Sulbarán Zambrano, E. A. (2024). Afectación del páramo desértico por la actividad turística en el Parque Nacional Sierra de la Culata, Mérida-Venezuela. *Análisis Geográficos*, 57(1), 140 - 154.

¹ La presente investigación es producto de un trabajo de grado para optar al título de geógrafa de la Escuela de Geografía de la Universidad de Los Andes, Mérida-Venezuela, y es parte de las actividades desarrolladas por Anairamiz Aranguren B. con el apoyo de Scholar Rescue Fund y de la Fundación Ceiba en Colombia.

² Universidad de Los Andes, Mérida - Venezuela. anairamiza@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5855-8539>.

³ Universidad de Los Andes, Mérida - Venezuela. diaziris989@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0469-7060>.

⁴ Comisión Mundial de Áreas Protegidas (CMAP-UICN), Capítulo Venezuela. elidesasz2010@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2996-2109>.

Correspondencia: Anairamiz Aranguren Becerra. Carrera 27 a #49a Bogotá - Colombia.

Abstract

We present the status, valuation and conservation of an Altiandino ecosystem as a consequence of tourism and sports activities in a section of the Mífafí - La Culata trail, Sierra de La Culata National Park in Mérida, Venezuela. A literature review and a visual interpretation of the biophysical variables were made using the satellite image. Data was collected on the number of visits registered. Changes in vegetation cover were estimated using a direct field assessment method that allowed measuring the percentage of cover prior to the sports competition (45k), through 20 plots of 4 m² parallel to the road, distributed over a length of 12 kilometers. The results showed that there is a constant flow of people on this trail, since the width of the road varies from 0.25 to 9 meters. The average number of footprints counted for each plot fluctuated between 25 and 75, showing which reflects that the vegetation cover on and near the road is subject to constant intervention and that the observed changes in vegetation cover are closely related to the road. This route of sports competitions, increases the natural susceptibility of the vegetation and soil. A series of measures are proposed in line with the SDGs to preserve this natural heritage of Venezuelans and the high mountains.

Keywords:

protected area, SDGs, altiandino páramo, national park, tourism

Introducción

La situación ambiental mundial es inquietante, pues la magnitud de la intervención antrópica es cada vez mayor en todos los ecosistemas a escala global. El modelo de desarrollo en el mundo industrializado genera importantes desequilibrios ambientales y enormes brechas sociales, económicas y de desarrollo humano en el planeta. La Agenda 2030 del Desarrollo Sostenible, aprobada por la Asamblea General de las Naciones Unidas (2015), da contexto a la visión transformadora hacia la sustentabilidad económica, social y ambiental.

En la cordillera de Los Andes, con 8.000 kilómetros —desde el Caribe hasta Tierra de Fuego— es el sistema montañoso más largo y el segundo más alto del planeta (Escobar-Mamani et al, 2020) por lo que es un laboratorio natural donde se presentan desafíos y oportunidades comunes a los países andinos.

En el contexto suramericano, la región que abarca a los Andes ha sido reconocida como ámbito de retos para el logro del desarrollo sostenible, destacando el de sanear el largo descuido oficial y orientar los esfuerzos públicos y privados a lograr, entre otros propósitos:

[p]roteger la mayor diversidad que queda en el mundo y que se encuentra en una situación de grave riesgo, por una parte, como consecuencia de la pobreza crítica y de la poca preparación de los gobiernos y la sociedad civil para el manejo adecuado de las cuencas, bosques fauna y conservación de los suelos; y, por otra, como consecuencia de crecientes intereses endógenos y exógenos en aprovechar las potencialidades económicas de los recursos contenidos en ella. Muchos de los parques nacionales y otras áreas protegidas de los Andes han sufrido los efectos de la reducción del papel del Estado en la región, que ha disminuido su presencia y recursos en las tareas de protección de los recursos y ecosistemas que contienen (Comisión de Medio Ambiente y Desarrollo de América Latina y el Caribe, 1996, p. 167).

En Venezuela el deterioro ambiental es evidente, pues todos los ecosistemas han sido intervenidos y, durante el presente siglo,

gravemente dentro de los parques nacionales y monumentos naturales. Igual situación enfrentan los demás países de la Cordillera de los Andes y sus sistemas gubernamentales dirigidos al resguardo del patrimonio natural.

El turismo es considerado por la Organización Mundial del Turismo (OMT, 1999) como un fenómeno social, cultural y económico relacionado con el movimiento de las personas a lugares que se encuentran fuera de su lugar de residencia habitual. Existen diversos tipos que se ajustan al gusto del visitante, dentro de parques nacionales o no, y pueden generar impactos positivos o negativos según las características de inestabilidad de las áreas visitadas.

El turismo sostenible (OMT, 1999) permite que se atiendan las necesidades de los turistas actuales y de las regiones receptoras y, al mismo tiempo, protege y fomenta las oportunidades futuras. Es una vía hacia la gestión de todos los recursos de forma que satisfagan las necesidades económicas, sociales y estéticas, respetando la integridad cultural, los procesos ecológicos esenciales, la diversidad biológica y los sistemas que sostienen la vida.

Todos los países cuentan con espacios naturales que ameritan ser protegidos, conservados y preservados. En Venezuela, estos territorios se encuentran entre las categorías de Áreas Bajo Régimen de Administración Especial (ABRAE), según lo establecido en la Ley Orgánica para la Ordenación del Territorio (1983) en sus artículos 15 y 16 (Ayube, 2011). Los parques nacionales están definidos como aquellas superficies del territorio relativamente extensas, en las cuales están representados uno o más ecosistemas, áreas naturales y paisajísticas, de valor nacional e internacional, que no hayan sido esencialmente alteradas por la acción humana, las especies vegetales y animales, las condiciones geomorfológicas y los hábitats sean de interés para la ciencia, la educación y la recreación.

La cobertura vegetal tiene influencia en el meso y microclima, el recurso hídrico, y la diversidad de las especies terrestres. Diferentes estudios realizados (Aldana y Bosque, 2008a, Aldana y Bosque, 2008b; y Buitrago et al, 2012) señalan la importancia de este indicador como variable que permite conservar los ecosistemas de páramo andino y altiandino, puesto que ambos se caracterizan por presentar rasgos de alta fragilidad ambiental, especialmente el páramo desértico, caracterizado por presentar alta radiación

solar, bajas temperaturas y poca precipitación, haciendo que las especies vegetales se adapten a estas condiciones extremas.

El Parque Nacional Sierra de La Culata (PNSC) destaca por una belleza paisajística única, con oportunidades para diferentes actividades turísticas según el gusto del visitante. Lo difícil es la administración de las actividades que se deben ejecutar a cabalidad, para preservar los espacios naturales en un páramo en la cordillera de los Andes.

El trayecto Mifafí-La Culata presenta características geomorfológicas, de flora y fauna, atractivos para diversas actividades de turismo y la recreación. En el área de estudio ocurre anualmente la llamada "Carrera 45k Mérida Running" desde 2014. En el 2020 participaron 200 personas, nacionales y extranjeros, preparados con anticipación para realizar este evento. Es una ruta de gran belleza escénica que requiere preparación de alto nivel físico, porque parte de su recorrido es sobre los 4.200 m.s.n.m.

Inicialmente, esta carrera se denominó 38k, por el recorrido desde el Alto de Mifafí hasta La Culata. Actualmente se conoce como 45k, ya que se incluyeron 7 km desde Pico El Águila hasta el Alto de Mifafí.

Para esta investigación, se recopiló actividades turísticas o recreativas que conllevan cambios en la cobertura vegetal, realizadas en parques nacionales. Aun siendo este tema importante, desde el punto de vista de la conservación no existen muchas publicaciones similares en Venezuela, y plantea una reflexión sobre los retos de evaluar y corregir la actividad turística que se efectúa sin organización, en el contexto de la sustentabilidad, y sin acatar las normas ambientales.

Por este motivo, se buscó evaluar los cambios en la cobertura vegetal como consecuencia de las actividades turísticas en un tramo de la ruta Mifafí-La Culata del PNSC para proponer alternativas sostenibles para estas actividades. Además de obtener información sobre condiciones biofísicas y afectación por actividades turísticas y deportivas, extrapolable al tramo de la ruta evaluado. También, se buscó estimar los cambios en la cobertura vegetal como consecuencia del uso turístico en un tramo de la ruta Mifafí-La Culata. Finalmente, proponer, en función de los cambios observados en la cobertura vegetal, alternativas sostenibles de uso para la ruta Mifafí-La Culata.

Aspectos generales del área de estudio

El PNSC forma parte de la cordillera de Los Andes, cadena montañosa que atraviesa el continente suramericano y, en Venezuela, se divide en la Sierra de Perijá y la cordillera de Mérida la cual, a su vez, está compuesta por dos serranías paralelas, la Sierra Nevada y la Sierra de La Culata, separadas por una fosa tectónica configurada por el sistema de fallas Boconó.

Este parque se localiza en el ramal nororiental de los Andes venezolanos, entre los estados Mérida y Trujillo, ocupando una superficie de 200.400 ha. El rango de amplitud térmica varía alrededor de los 10°C a 15°C; la temperatura promedio anual oscila entre los 2°C hasta los 24°C. Geográficamente incluye los páramos: El Tambor, Campanario, Piedras Blancas, Mucuchíes, y en la divisoria de aguas de los ríos Motaatán y Santo Domingo, los páramos Hato Viejo, La Estrella y Monigote (Rincón et al, 2007).

El presente trabajo se realizó en el páramo de Piedras Blancas, localizado hacia el noreste del área de estudio, a más de 4.000 m.s.n.m; en este se ubica el páramo desértico de Venezuela, de

bajas temperaturas, poca precipitación, alta radiación solar y vegetación vascular escasa. Destaca un modelado glacial abrupto y escarpado con presencia de circos glaciares.

Los páramos El Banco y Los Buitres se ubican hacia el extremo sureste y noreste del área de estudio, predomina la presencia de circos glaciares que se distribuyen de forma escalonada, y se remarca la cresta de la divisoria de agua entre la quebrada El Banco y la quebrada Los Buitres, precedido de valles glaciares y sobre todo un elevado número de lagunas de origen glaciar a partir de las cuales se observa la naciente de la quebrada El Banco y destacan la laguna La Escopeta, laguna Grande Los Patos, laguna Larga y laguna La Estrella.

En el extremo noreste del área se observa la cresta que divide la cuenca de la quebrada Palito Negro en el páramo de Piedras Blancas y la quebrada El Banco, cerca del pico Mesa Redonda, en el páramo El Banco. Se visualiza en el extremo este del área la cresta que divide la cuenca de la quebrada El Banco y la quebrada Los Buitres, cerca del pico Los Chorros (Figura 1).

Metodología

Para cumplir con los objetivos planteados se realizó una secuencia ordenada de actividades que incluyó procesamientos bibliográfico y analítico, respaldados con trabajo de campo (Figura 2).

Para procesar la información base se manejó la escala de trabajo 1:25.000 para elaborar el mapa topográfico. Para realizar la cartografía temática correspondiente a factores biofísicos se utilizó 1:5.000; estos elementos fueron topografía, categorías de pendiente, geomorfología, orientación del relieve, pisos térmicos, unidades ecológicas (Ataroff y Sarmiento, 2003) y cobertura vegetal, mediante la interpretación visual de la imagen Bing de la plataforma Sasplanet del 07 de julio de 2019, de resolución espacial 1 m y código 4.0.10.

En la descripción de los aspectos socioculturales se revisaron los mapas de división político-territorial y el Plan de Ordenamiento y Reglamento de Uso del PNSC (PORU), apoyándose con la utilización de un modelo digital de elevación de AlosPalsar de 2008 de alta resolución (12,5 m). Los datos levantados durante el trabajo de campo se procesaron mediante la utilización del programa Excel y el software libre QGIS 2.18 versión Las Palmas.

A continuación, se presenta de manera detallada el proceso metodológico:

Etapa I. Revisión bibliográfica

Se revisó la bibliografía sobre investigaciones en torno al tema a desarrollar, se empleó la información de diferentes instituciones: bibliotecas de la Escuela de Geografía de la Universidad de los Andes, del Instituto Nacional de Parques (INPARQUES), del Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE), y de la mapoteca del Instituto de Prevención y Administración de Desastres del Estado Mérida (INPRADEM).

Se recopiló datos del número de visitas para los meses de febrero, marzo, abril y mayo de los años 2016, 2017, 2018 (INPARQUES), que indican la cantidad de visitantes que entraron al Parque. Para 2019, INPARQUES contaba con las estadísticas del puesto de guardaparques El Jarillo (La Culata), mientras en Mifafí no contaba con ningún tipo de registro sobre la cantidad de ingresos.

Figura 1 - Localización geográfica del área de estudio

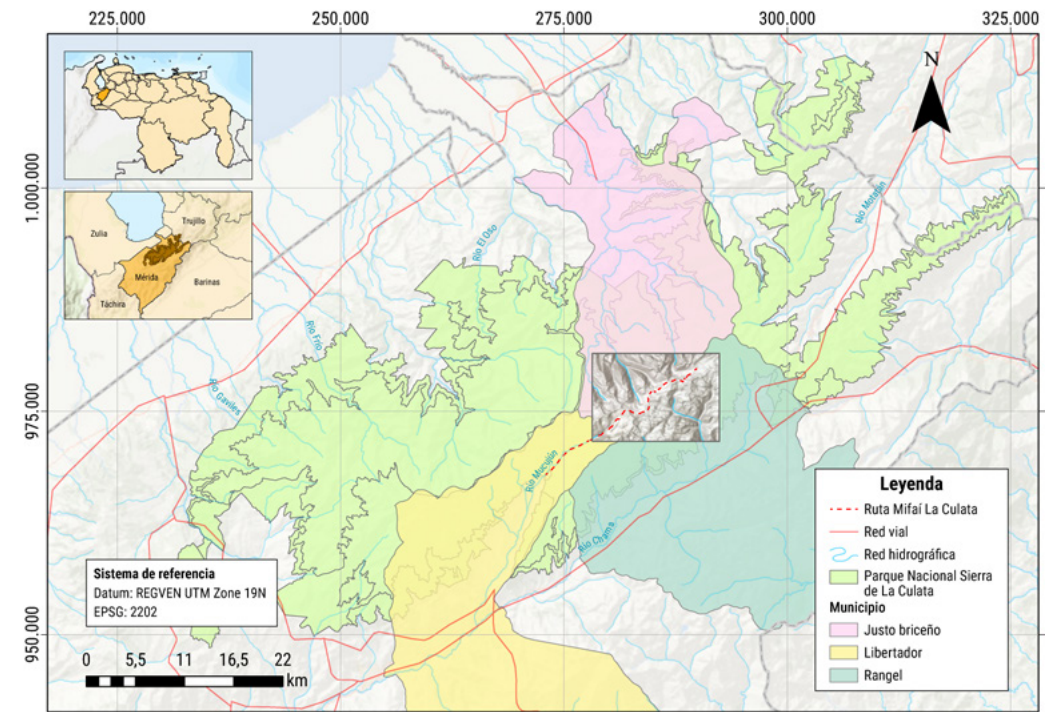
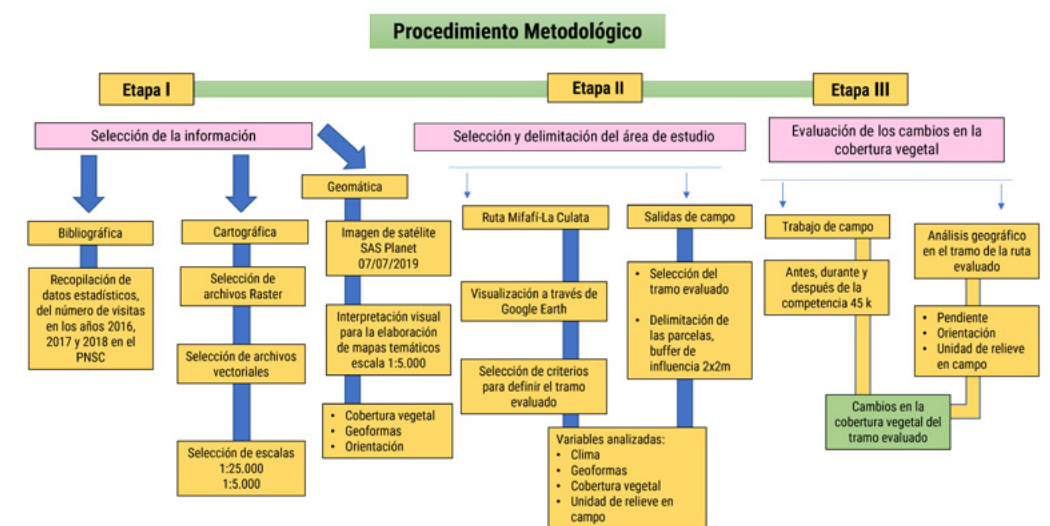


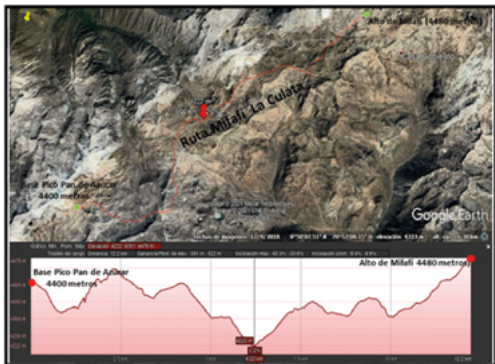
Figura 2 - Esquema metodológico



Etapas II. Selección y delimitación del área de estudio

Se consideró, como factor primordial, el sendero que conecta el Valle de Mifafí con La Culata. Se realizó una salida de campo que incluyó toda la ruta; sin embargo, se seleccionó un tramo de 12 kilómetros (Figura 3).

Figura 3 - Área de aptitud alta (3) para cada municipio



El punto inicial se asumió en el alto de Mifafí, divisoria de aguas entre las cuencas de Chama y Torondoy, sobre la carretera que conduce a Mucumpís y Torondoy, a una altitud de 4.481 m.s.n.m.; como punto final del tramo evaluado, se tomó la base de Pan de Azúcar, a una altitud de 4.400 m.s.n.m. La selección y delimitación del área de interés se realizó a través de niveles escalares diferentes, puesto que para realizar el mapa topográfico se utilizó la escala 1:25,000, con información de la cartografía oficial. Para la realización de la cartografía temática se utilizó una escala detallada 15,000, a través de la interpretación visual de la imagen satelital SAS Planet de 2019, y para definir las parcelas a evaluar se utilizó un nivel escalar 1:1, observación directa en el terreno. Se consideró el tramo apropiado por ubicarse en una sección del trayecto donde la actividad turística está poco influenciada por la distancia desde las vías carreteras y la mayor cantidad de visitas son dirigidas a senderismo, excursionismo o, en este caso, deporte.

Este tramo se emplaza sobre un área que mantiene prístinas sus características naturales, con bajo nivel de intervención, las que se describieron sobre un buffer de distancia fija, paralelo a la ruta, que cubre una superficie de 2739,24 ha que incluye los 12 km evaluados, a través de los puntos de observación y de control ubicados en diferentes unidades de relieve y topográficas, que permitieron evaluar los diferentes porcentajes de ocupación de la cobertura, en ventanas de observación posicionadas sobre el sendero y próximas a este.

Criteria utilizados para la selección del tramo de la ruta evaluado

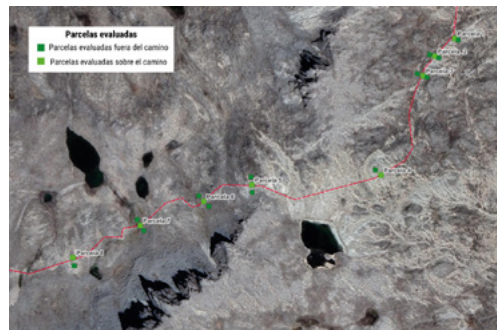
1. Debe contener una sección de páramo desértico, condición importante para el estudio, dado el alto grado de fragilidad ecológica que caracteriza a este ecosistema.
2. Debe poderse evaluar la cobertura en diferentes unidades de relieve y topográficas, incluyendo pendiente, lechos rocosos, valles y laderas.
3. Debe tener el menor grado de perturbación y recibir la menor cantidad de visitas, para que se observen las características naturales del ecosistema.

Con la primera salida de campo se marcaron ocho sitios o puntos de observación, ubicados sobre el camino y doce fuera del camino; en diferentes unidades de relieve, incluyendo laderas, valles, lechos rocosos y humedales, en orientación de umbría o solana; estas parcelas tienen una superficie de 4 m², se definieron a escala detallada de terreno (Tabla 2). La Figura 4 señala el total de puntos evaluados ubicados sobre el sendero y fuera del sendero.

Tabla 1 - Sitios evaluados para medir el porcentaje de cobertura

Sitio	Sobre el camino	Fuera del camino	Total
1	1	1	2
2	1	2	3
3	1	1	2
4	1	1	2
5	1	2	3
6	1	2	3
7	1	2	3
8	1	1	2
Total	8	12	20

Figura 4 - Localización de los 20 sitios delimitados en campo



Selección de variables

Las variables seleccionadas para evaluar los cambios en la cobertura vegetal dentro de la ruta corresponden a elementos biofísicos que determinan y condicionan el tipo de cobertura vegetal del PNSC, en zonas que superan los 3.000 m.s.n.m.

Las geoformas ubicadas en el área de estudio, según lo describen Schubert y Valastro (1973) y Sánchez (2016) corresponden a circos glaciares, aristas, valles glaciares en forma de "U" y lagunas de origen glacial en toda el área. Se empleó la interpretación visual de la imagen satelital SAS Planet de 2019, y se clasificó el relieve en cuatro categorías de laderas: ligeramente inclinadas, inclinadas, escarpadas y valles glaciares, aristas, crestas, morrenas y circos glaciares. Esta interpretación permitió explicar las geoformas que constituyen la sección en estudio de la ruta, considerando las laderas como el elemento topográfico que define casi la totalidad el área.

Según la clasificación de Ataroff y Sarmiento (2003) el área está cubierta por páramo altiandino, que se presenta en las vertientes secas entre 4.000-4.800 m.s.n.m., temperatura promedio de 3°C a -2°C y precipitación promedio anual entre 700-1.000 mm. En las vertientes húmedas, entre 1.000-1.600 mm, hay una alta frecuencia de heladas todo el año. Incluye el páramo desértico con baja cobertura vegetal, vegetación baja, dominando arbustos y plantas en cojín, menores de 40 cm de altura y un estrato alto (a veces ausente) entre 3 m y 4 m, dominado por rosetas gigantes de

Espeletia timotensis Cuatrec. y *Coespeletia spicata* (Sch.Bip. ex Wedd.) Cuatrec. En el estrato bajo hay *Arenaria jahni* S.F.Blake, *Azorella julianii* Mathias & Constance, *Aciachne pulvinata* Benth, *Draba chionophila* S.F.Blake, y *Hinterhubera lasaguei* Wedd. Se reportan especies invasoras como *Rumex acetosella* L. (Sarmiento et al., 2003).

Para elaborar el mapa de cobertura vegetal se interpretó la imagen SAS Planet de 2019, a partir de variables como el tono, la textura y el color, se discriminaron cinco categorías de vegetación. La leyenda utilizada fue la definida por Oyola (2009) en el mismo ecosistema y las categorías son fácilmente detectables. Las categorías utilizadas (Tabla 3) fueron adaptadas al área de estudio.

Tabla 2 - Leyenda empleada en el mapa de cobertura

Número	Categoría	Simbología
1	Arbustos hierbas húmedas	AHh
2	Arbustos hierbas secas	AHs
3	Rosetal	R
4	Colchones compactos	C
5	Suelo sin cobertura vegetal	sv

Fuente: adaptado de Oyola (2009).

Etapas III. Evaluación de los cambios en la cobertura vegetal

Para estimar los cambios en la cobertura vegetal, se trabajó con evaluación directa en campo, efectuada en una inspección previa a la carrera 45k y otra durante la carrera. Así, se pudo comparar el nivel de afectación de la cobertura vegetal tras la ocurrencia de la competencia. La primera, con personal del INPARQUES y personal del ICAE.

Se evaluaron indicadores cualitativos para estimar la perturbación a la cobertura vegetal por el pisoteo: contextura, altura, peso y tipo de calzado de algunos competidores. Se elaboró una planilla con indicadores visuales que permitió estimar, cualitativamente, el tipo de calzado y el sexo. El peso y la altura promedio permitieron estimar la contextura de los visitantes.

La intensidad del pisoteo a la vegetación se evaluó antes y después que pasaran 50 competidores de la carrera 45 k (Mérida Running, s.f.). La intensidad del pisoteo se midió con un cronómetro para verificar los intervalos de tiempo entre competidores, con el apoyo de un técnico con radiotransmisor. El número de pisadas se calculó contando las huellas en el camino, antes de que pasara el primer competidor y después de pasar 50, para comparar la perturbación generada al suelo y la vegetación (Figura 5).

El número de pisadas se respaldó con un registro fotográfico previo a la carrera, durante la carrera y después de la carrera, hasta que pasaron 50 competidores. La extrapolación de la información biofísica en el tramo de la ruta Mifafí-La Culata, a partir de la

información cartográfica, se realizó con un análisis geográfico en el tramo evaluado, y afectación por la actividad deportiva. En función de los aspectos biofísicos evaluados, a partir de la base cartográfica y con la información levantada en campo, se extrapolaron las características biofísicas de cada una de las parcelas. La Tabla 4 señala las variables biofísicas utilizadas y los atributos de cada una de ellas.

Tabla 3 - Variables biofísicas empleadas en el análisis geográfico y atributos

Parcelas	Pendiente	Orientación	Unidad de relieve considerada en campo
1	Suave	Solana (norte, este y sureste)	Laderas Lechos rocosos
2	Moderada	Umbría (norte, noroeste, oeste, suroeste y sur)	Fondo de valle
3	Fuerte		
4	Escarpada		
5			
6			
7			
8			

Mediante el software QGIS 2.18 se generó un geoproceso a partir de la caja de herramientas vectoriales. Se elaboró una unión, utilizando el término que especifica el programa de los mapas de orientación y con sectores de pendientes, es decir, el cruce de información de estos atributos. A partir de esta unión o cruce, se generó automáticamente una tabla de los atributos en común de esas variables para cada parcela. Esta acción vectorial permitió extrapolar la información biofísica determinada por los mapas temáticos y el trabajo de campo, a diferentes puntos del tramo evaluado. Así, se determinaron áreas similares como parte de los resultados obtenidos en esta investigación.

Finalmente, se elaboró una categorización que permitió diferenciar las parcelas con base en la perturbación (Tabla 5).

Tabla 4 - Categorías definidas y nivel de perturbación de las parcelas evaluadas

Categorías	Perturbación
1	Alta
2	Moderada
3	Baja
4	Muy baja

Figura 5 - Punto de control para estimar indicadores salida de campo 2

Fotografía de Díaz, febrero de 2020.



Resultados y discusión

El tramo de la ruta Mifafí-La Culata es un espacio que engloba diferentes unidades geomorfológicas de los Andes venezolanos, con topografías abruptas que superan los 3.000 m.s.n.m en unidades ecológicas de páramos andinos y altiandinos. Esto se aprecia en el mapa de geoformas (Figura 6).

Las laderas se distribuyen de manera heterogénea en toda el área. La unidad correspondiente a laderas ligeramente inclinadas ocupa la menor superficie, 265,34 ha, equivalente al 9,76%. La unidad

2 corresponde a unidades de laderas inclinadas que ocupan una superficie de 1.164,08 ha, equivalente al 42,80% del área de estudio. La tercera unidad son las laderas escarpadas que abarcan 1.102,55 ha, 40,54% del área de estudio. La unidad conformada por valles glaciares ocupa 155,40 ha, 5,71% de superficie total del área. Las lagunas glaciares, como categoría independiente de las laderas, cubren 32,16 ha, 1,18% (Figura 7).

Las temperaturas corresponden a los pisos térmicos muy fríos y gélidos (menor a 7°C) y precipitación en forma de escarcha y nieve. El piso térmico muy frío ocupa una superficie de 242,52 ha

(8,85% del área analizada), con temperaturas entre 3,0°C y 7,9°C. Perteneciente a la provincia pluviométrica escasamente lluvioso con precipitaciones de 300 mm a 699 mm al año, con precipitaciones en forma de nieve, con escarcha durante todo el año, se distribuye desde la cota 3.350 m.s.n.m. hasta los 4.200 m.s.n.m.

La superficie ocupada por el piso térmico gélido es de 2.496,72 ha (91,15%), con temperaturas entre -2°C y 2,9°C, asociado a la provincia pluviométrica de escasamente lluvioso, con valores de precipitación promedio anual de 300 mm a 699 mm, en forma de nieve.

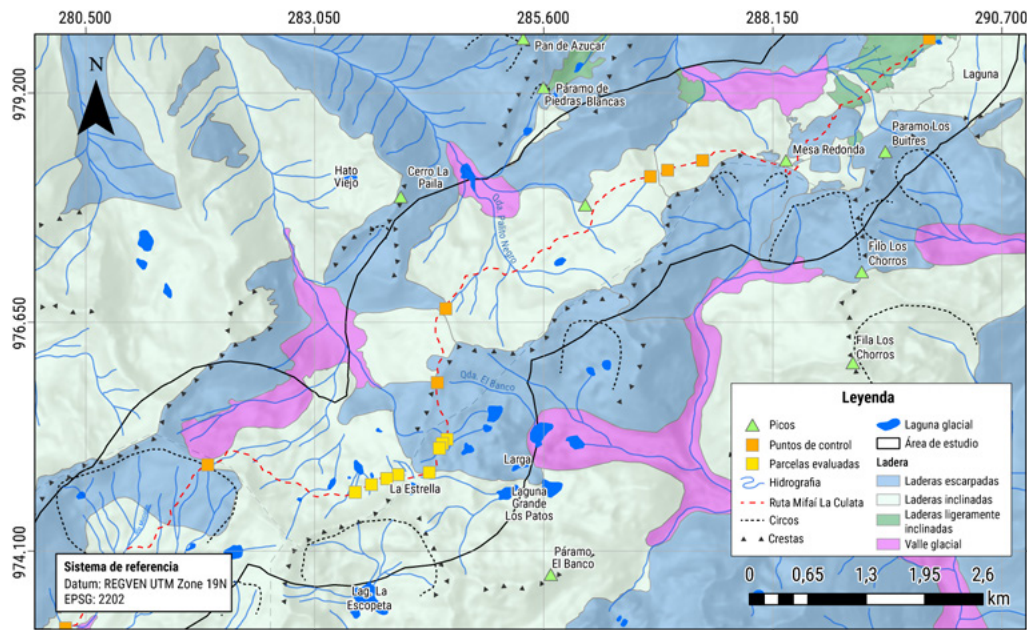
Con respecto a la cobertura vegetal, hay una gran heterogeneidad, hay suelo desnudo y una gran cantidad de rocas que forman mosaicos o parches de diferentes coberturas. En campo se identificaron cinco categorías que se visualizan en el mapa de cobertura vegetal (Figura 8).

La vegetación dominante se distribuye en forma de mosaico, presentando grandes vacíos desprovistos de vegetación y la presencia de rosetas de diferentes géneros de *Espeletia*, se encuentran especies de *E. lutescens*, *E. timotensis*, *E. moritziana*, *E. semiglobulata*, y *E. spicata* a las cuales se denominarán como rosetales (Figura 9a). También, hay colchones compactos conocidos como cojines, formados por

diferentes especies vegetales que crecen pegados al suelo, al igual que los musgos y líquenes, que se desarrollan sobre áreas húmedas y se distribuyen de manera dispersa (Figura 9b). Las formaciones de arbustos hierbas húmedas y secas se asocian a factores de pendiente moderada, laderas inclinadas, ligeramente inclinadas y fondos de valle, que registran la mayor cobertura de vegetación, al igual que los humedales altiandinos (Figura 9c y 9d), y los sitios con rocas de diferente tamaño y grado de fragmentación (Figura 9e).

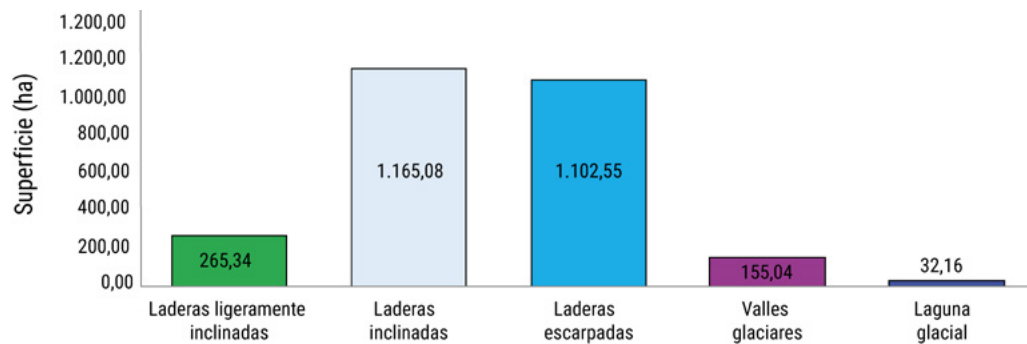
La Figura 9 muestra que el porcentaje de cobertura vegetal es dominado por suelo sin vegetación para la categoría camino y fuera del camino con exposición de solana (este). Dicha parcela se muestreó sobre las áreas cercanas a la laguna La Estrella, caracterizado por un punto de alta erosión eólica y alta radiación solar que incide directamente sobre la estructura del suelo. Las plantas encontradas dentro de la parcela están asociadas a individuos aislados o parches de vegetación adaptados a condiciones de unidades de páramo altiandino y páramo desértico, con bajos niveles de precipitación media anual y valores de temperatura baja con amplitud térmica elevada.

Figura 6 - Geoformas presentes en el área de estudio



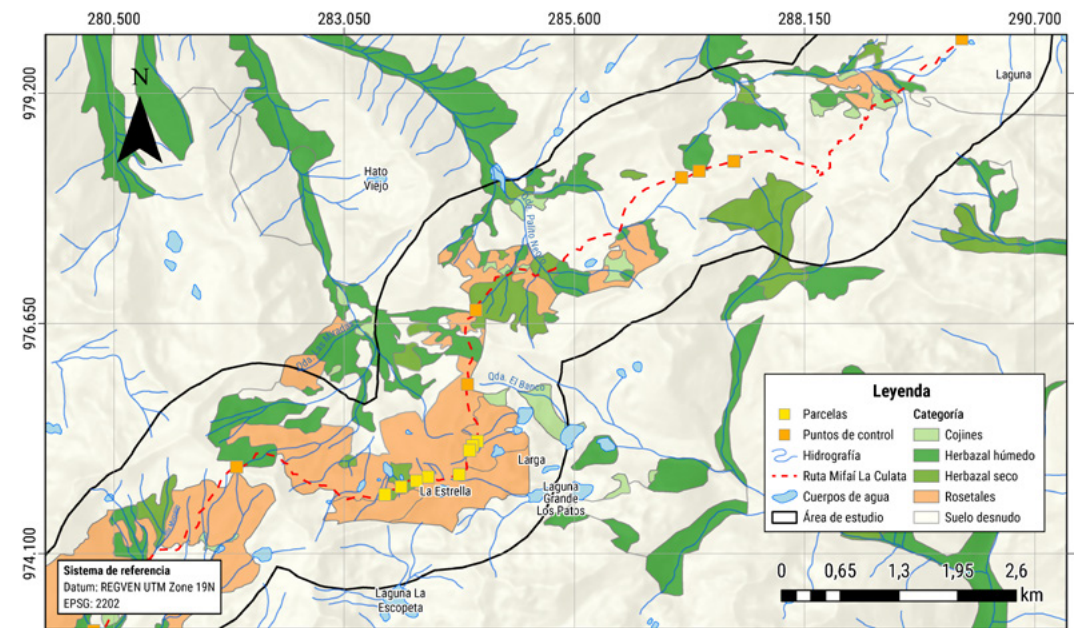
Fuente: Díaz (2021).

Figura 7 - Superficie de ocupación de las categorías de geoformas en el área de estudio



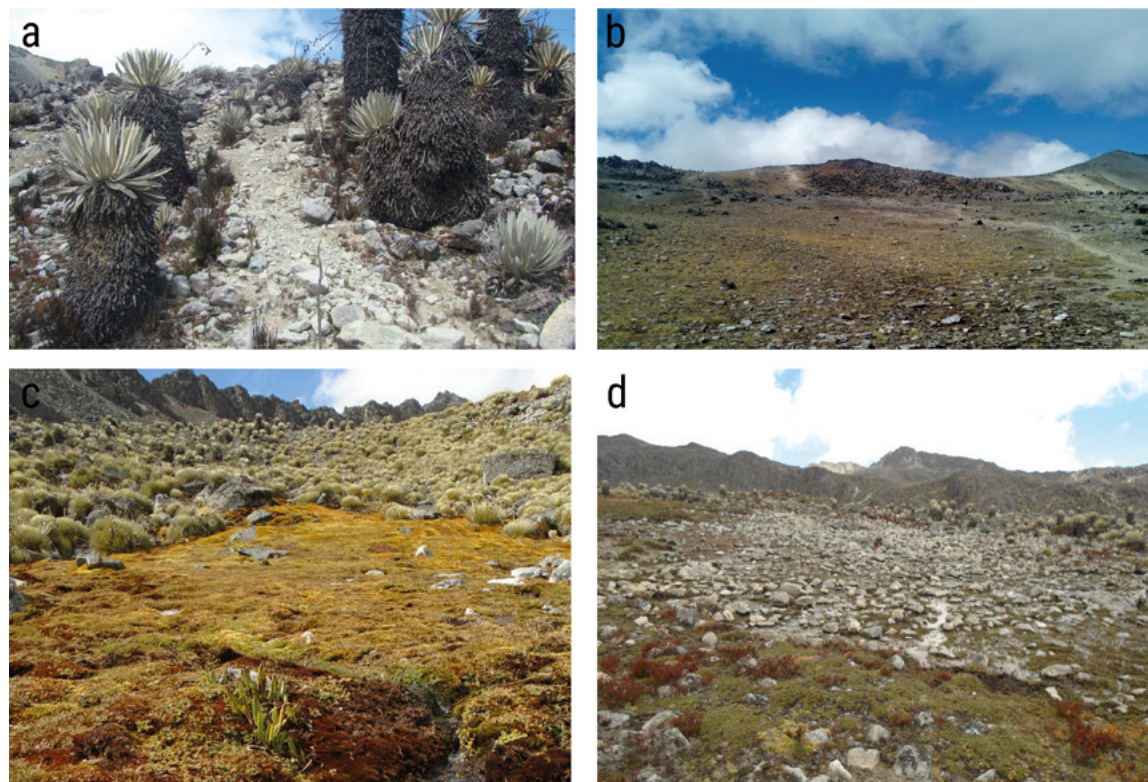
Fuente: Díaz (2021).

Figura 8 - Mapa de cobertura vegetal del tramo de la ruta Mifafí-La Culata



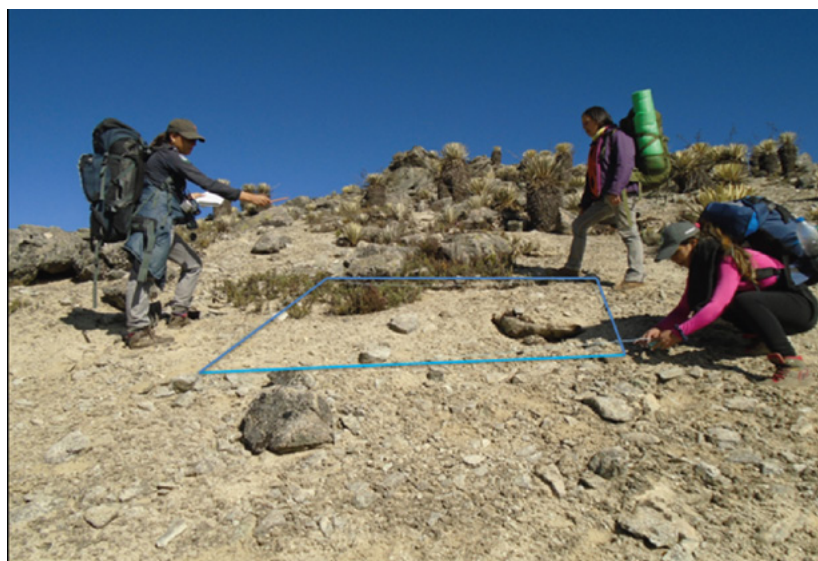
Fuente: Díaz (2021).

Figura 9 - Imágenes de la cobertura vegetal



Fotografías de Sulbarán, enero de 2021
Nota: a) rosetales; b) colchones compactos (cojines); c) arbustos hierbas húmedas; y d) arbustos hierbas secas.

Figura 10 - Formas de estimación de cobertura realizada en la parcela ubicada en áreas de la laguna La Estrella



Fotografías de Sulbarán, enero de 2020

A través de la interpretación visual de la imagen de satélite de la plataforma SAS Planet, a escala detallada, demuestra que el sendero al igual que las parcelas muestreadas en campo presentan la mayor superficie de suelo desnudo, puesto que el mismo es el paso obligatorio de las personas, ya que la influencia que ejerce el tránsito sobre la vegetación, se refleja en la disminución de la cobertura vegetal; sin embargo, es oportuno señalar que las parcelas ubicadas en orientación este y oeste refleja un alto porcentaje de suelo desnudo, ya que están precedidas de roca sólida o grava. En la zona del humedal, el mayor porcentaje de cobertura está bajo el dominio de la categoría agua, llegando al 60%.

Se observa que la categoría vegetación con musgos y líquenes alcanzan un 50%, ya que la vegetación que se adapta a un humedal de tipo turbera está compuesta de especies de briofitas y líquenes (Potentini, 2008). La categoría fuera del camino con exposición oeste, refleja un porcentaje significativo de vegetación vascular,

musgos y líquenes, debido a que la parcela no está directamente ubicada sobre el humedal como la evaluada en la categoría camino.

Los humedales altiandinos localizados sobre elevaciones superiores a los 4.000 m.s.n.m se recargan de agua, razón por la cual se identifica un porcentaje elevado de musgos y líquenes a esta categoría (sin camino con exposición este, sin camino con exposición oeste), es oportuno señalar que los humedales son una fuente indispensable de agua y reservorio hídrico y ecológico (Monasterio y Molinillo, 2003; Salas, 2003; Llambí et al, 2006; Potentini, 2008; Llambí et al., 2013).

Hay un predominio de la categoría suelo sin vegetación (Figura 11). Este resultado refleja la incidencia del páramo desértico y las condiciones de estrés continuo sobre las especies de plantas encontradas (Monasterio, 1979; 1980; Monasterio y Molinillo, 2003). Se afirma lo que se ha venido indicando, que la categoría camino ejerce mayor influencia sobre áreas sin cobertura vegetal.

Figura 11 - Parcela realizada en una zona de ladera ligeramente inclinada



Fotografía de Sulbarán, enero de 2020.

La vegetación de la ruta Mifafí-La Culata está bajo un continuo estrés hídrico y térmico. La topografía y el clima al que es sometida la vegetación en el piso altiandino y periglacial configuran un alto nivel de adaptación ambiental con un grado de fragilidad ecológica única en el mundo. En el área de estudio para 2019 había un 70% de la superficie sin cobertura vegetal, es decir el suelo estaba expuesto a sufrir erosión hídrica y procesos de crioreptación por los ciclos de congelamiento y descongelamiento, manteniendo una barrera natural que limitaba ampliamente la propagación de la flora en estos pisos altitudinales, donde se observaron parches de cobertura vegetal con una distribución horizontal más que vertical.

La Tabla 6 resume la superficie ocupada por cada clase de cobertura. La clase denominada arbustos-hierbas en sitios húmedos ocupa una superficie de 242,21 ha, que equivale al 8,84%.

Los arbustos-hierbas en localidades secas abarcan 142,21 ha, 5,19% del área evaluada. Los rosetales alcanzan 571,70 ha (20,87%). Los colchones compactos cubren 50,46 ha cerca del 1,84% del área total, principalmente en fondos de valles y laderas ligeramente inclinadas y moderadas. Los suelos sin cobertura vegetal ocupan la mayor proporción de superficie, llegando a 1736,33 ha, 63,38% de cobertura distribuida en el área.

Tabla 5 - Ocupación de las categorías de cobertura en el tramo de la ruta Mifafí-La Culata

Categoría	Superficie (ha)	%
Suelo sin cobertura vegetal	1736,33	63,38
Rosetales	571,70	20,87
Arbustos hierbas húmedas	242,21	8,84
Arbustos hierbas secas	142,21	5,19
Colchones compactos	50,46	1,84

Los rosetales de diferentes especies de *Espeletia* ocupan un 21%, los arbustales y hierbas en lugares húmedos y secos cubren el 14%, y los céspedes o colchones compactos de páramo ubicados en los humedales y sitios con exceso de agua alcanzan el 1% de la cobertura. Factores ambientales como las bajas temperaturas y la inestabilidad de los suelos aumentan el porcentaje de suelo descubierto, por los procesos periglaciales a partir de los 4.000 m.s.n.m. en el páramo desértico y el desierto periglacial. La cobertura vegetal se asocia a suelos con rosetas, arbustos, hierbas y plantas creciendo en forma de céspedes.

En campo se cuantificó el ancho del camino y el número de pisadas que se observaron para evaluar el impacto que puede tener el pisoteo sobre la cobertura (Tabla 7).

Tabla 6 - Datos del ancho del camino y número de pisadas evaluados en la primera salida de campo sobre las parcelas localizadas sobre el sendero

Parcelas de observación sobre el sendero	Ancho del camino (m)	Promedio ancho del camino (m)	Número de pisadas (huellas)
1	1,50	1,50	38
2	5,00;5,60;8,80	6,46	30
3	5,00	5,00	25
4	0,52;0,71;0,63	0,62	75
5	0,25;0,32;0,28	0,28	25
6	0,60;0,71;0,58	0,63	32
7	4,00;3,00;3,30;3,70	3,50	41
8	0,45;0,62;0,63	0,57	47

La Tabla 8 muestra que el ancho del camino, en el trayecto estudiado, varía considerablemente, registrando valores mínimos de 25 centímetros en los senderos más angostos y valores máximos de 8,8 m en otros tramos. Los resultados son altamente heterogéneos y el camino a lo largo de su trayecto puede ampliarse, esto como consecuencia de las características del área. En zonas escarpadas y de difícil acceso se evidencia que el ancho del camino es mayor, ya que la ruta establecida no se aprecia con facilidad y los senderistas no se limitan a un solo tramo, sino que caminan en diferentes direcciones. En áreas de pendiente baja o valles el ancho del camino es menor, ya que la visual de la ruta es alta y se puede caminar con mayor facilidad y menos esfuerzo, allí no supera los 40 cm.

Tabla 7 - Resultados del ancho del camino y el número de pisadas evaluados en el tramo de la ruta Mifaff-La Culata

Indicadores	26 de enero
1. Ancho del camino + desv	1,8+ 1,7
Máximo	8,80 m
Mínimo	0,25 m
2. Nº de pisadas promedio + desv	42,58+18,11
Máximo	75 huellas
Mínimo	25 huellas

En promedio, para el tramo evaluado el número de huellas es de 43, registrando valores máximos de 75 pisadas y valores mínimos de 25, es decir, el comportamiento de los datos es heterogéneo y la variación de estos es de 18,11, indicando que constantemente están fluyendo personas dentro del sendero establecido.

Contabilizar la cantidad de huellas permite estimar el total promedio de personas que pasaron dentro del área evaluada del parque y tener un indicador de la perturbación generada por la compactación de la estructura del suelo, ya que la misma dificulta el desarrollo radicular de las plantas, la aireación y penetración de

las raíces en el suelo, así como también ayuda a la disminución de los espacios porosos del suelo.

Se afirma que existe un constante paso de personas en la ruta Mifaff-La Culata, ya que el ancho del camino varía de 0,25 m a 9 m, en unidades de laderas inclinadas y fuertemente inclinadas, registrando los valores mayores en estas categorías, mientras que en fondos de valles relacionados con laderas ligeramente inclinadas se registraron los valores menos elevados (0,25 m) y la cantidad promedio de huellas contadas fluctuó entre 75 y 25, lo cual permite concluir que la cobertura vegetal que está sobre la ruta está sometida a un constante pisoteo y que este hecho influye directamente en la disminución de la vegetación localizada sobre el sendero y en áreas próximas a él, especialmente en las zonas donde la pendiente es moderada y fuertemente inclinada.

Estos resultados coinciden con los presentados por Oyola (2009) quien indica que las áreas con menos cobertura vegetal son las áreas de laderas en diferentes categorías, incluidas las laderas de soliflucción, el desierto periglacial en talud de gelificación, el arbustal herbazal húmedo en microescalones de ladera, el herbazal rosetal en laderas de soliflucción, las rocas aborregadas y el rosetal en laderas de soliflucción. Este autor afirma que esto se debe a procesos naturales propios de los páramos altiandinos y son más evidentes al ser influenciados por acciones antrópicas. El ecosistema por donde se realiza la competencia 45k presenta puntos críticos según sus condiciones intrínsecas.

Las categorías "Camino y Fuera del camino" (Figura 5) con orientación este y oeste, presentan gran heterogeneidad en los resultados; a pesar de que ambas categorías fueron realizadas en un área similar, en relieve influyó en la cantidad de cobertura vegetal evaluada para cada parcela, porque el mismo determina en gran medida la presencia de la vegetación, por ser un factor natural que se relaciona de manera directa a la disponibilidad de radiación solar y la intensidad con la que llega al suelo, puesto que el relieve funciona como un regulador natural que limita la incidencia directa del sol sobre la superficie, creando dos vertientes, una más húmeda y otra más seca, donde se evidencia una discontinuidad de la cobertura vegetal en zonas de solana y de umbría.

En las áreas donde la vegetación está expuesta al sol más horas al día, se registra mayores niveles de temperatura y mayor cobertura vegetal, caso contrario ocurre en las laderas de umbría donde la vegetación recibe menos horas de luz al día y la temperatura es menor al igual que la cobertura vegetal.

Los factores biofísicos como la topografía y el relieve en el piso periglacial se relacionan a pendientes fuertes, muy fuertes y escarpada que dominan la superficie; este factor es determinante en la cantidad de cobertura vegetal que se localiza sobre las parcelas de evaluación, puesto que a mayores pendientes se tiene menor cobertura vegetal en comparación de fondos de valles, pendientes moderadas y laderas ligeramente inclinadas.

Las condiciones de alta montaña determinan un régimen hídrico escaso para el periodo seco, donde se registran las mayores temperaturas; sin embargo, esto no quiere decir que durante el periodo de lluvia la disponibilidad de agua sea abundante, pues aquí se registran los valores más bajos de temperatura y la formación de escarcha. Este factor hídrico afecta los ritmos térmicos de crecimiento de la vegetación, configurando así estrategias de adaptación para colonizar áreas con condiciones de altas pendientes, bajas

temperaturas con oscilaciones térmicas elevadas, poca precipitación y disponibilidad de agua, seguido de procesos de gelificación y criorreptación, que hacen que la cobertura vegetal sea frágil y con un bajo nivel de respuesta ante perturbaciones ambientales.

Con respecto a la morfometría del área de estudio, las laderas son el elemento principal que se relaciona a los procesos periglaciales ocurridos durante el Cuaternario, la presencia de crestas que dividen importantes redes hidrográficas como la perteneciente a la quebrada Mirabas, Palito Negro o las nacientes del río Mucujún, se distribuyen de forma continua en el tramo de la ruta evaluada. Hay que mencionar además a los circos glaciares y escalones rocosos como unidades geomorfológicas que evidencian procesos glaciares pasados y que actualmente determinan ecosistemas integrados por formas de vidas adaptados a estas condiciones de laderas fuertemente inclinadas y escarpadas (Schubert y Valastro, 1979; Schubert y Vivas, 1993; Oyola, 2009).

Según el PORU, el área de estudio pertenece en su totalidad a la Zona Primitiva o Silvestre y, dentro de ella, todos los humedales son calificados como Zona de Protección Integral, por lo que su uso no permitiría competencias deportivas de esta intensidad, puesto que las formaciones vegetales y animales son frágiles ante actividades antrópicas. Las elevaciones montañosas de la ruta Mifaff-La Culata albergan reservorios de agua utilizados aguas abajo. Los frágiles humedales altiandinos que se distribuyen en esta área deben protegerse y debe evitarse cualquier perturbación como lo menciona el marco legislativo que los protege (Potentini 2008; Marrero 2018).

Los registros de INPARQUES señalan que la mayor afluencia turística del PNSC por el puesto de guardaparque Mifaff (5.204 visitantes en promedio), mientras que por La Culata (El Jarillo) es menor (1.191 visitas) y que constantemente existe un flujo de personas dentro de esta ruta (Tabla 9) en diferentes fechas entre 2016 y 2018.

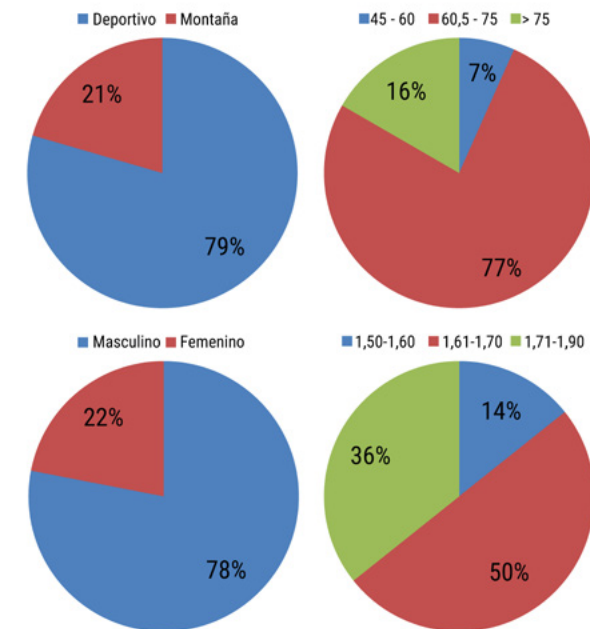
Tabla 8 - Datos de visitantes registrados en los puestos de guardaparques El Jarillo y Mifaff

Fecha	Sector La Culata	Sector Mifaff
Febrero 2016	2.004	15.123
Febrero 2017	1.154	8.117
Abril 2017	2.102	7.020
Mayo 2017	218	272
Febrero 2018	1.357	2.310
Marzo 2018	1.357	1.278
Mayo 2018	148	2.310
n	7	7
Mínimo	148	272
Máximo	2.102	15.123
Promedio	1.191	5.204

A partir de 2014 se realiza la carrera deportiva 45k, que refleja indicadores de perturbación hacia la vegetación perteneciente a la ruta o en áreas próximas a esta. Los senderos establecidos dentro de áreas naturales protegidas generan cambios en la vegetación, fauna y suelo, provocando perturbaciones leves o fuertes dadas las características de fragilidad del área. La ruta Mifaff-La Culata, como ya se mencionó, presenta alta fragilidad ambiental con puntos críticos de inestabilidad.

Los indicadores evaluados en campo muestran el impacto del evento 45k; existe un mayor número de participantes masculinos llegando a un 78% (Figura 12). Simultáneamente, la categoría femenina llega a un 22%. Este indicador refleja que las mujeres, con respecto a los hombres, generan menos fuerza al momento de correr y que el calzado debe ser apropiado para la conservación del suelo y para evitar lesiones dadas las características rigurosas de la ruta (Vicén et al., 2013).

Tabla 5 - Información de turistas y deportistas evaluados en la salida de campo del 23 de febrero de 2020



Nota: a) tipo de calzado de los deportistas; b) peso de los visitantes; c) sexo de los visitantes; y d) altura de los visitantes.

El tipo de calzado que utilizaron los competidores influye sobre la degradación del suelo y la compactación del mismo. La mayoría de los participantes utilizaron zapatos deportivos (79%), y 21% utilizó botas de montaña. Este indicador se argumenta a la pérdida de suelo por desgaste, es decir, la intensidad de la pisada y la cantidad de suelo que arranca el atleta con las botas *trekking* comúnmente llamados zapatos de montaña o botas de montaña es mayor que si utilizara calzado deportivo (Vicén et al., 2013).

El número de pisadas incrementó de 180 huellas a 600, midiendo esta cantidad antes de que pasaran 50 competidores, número que resulta alarmante; sin embargo, es coherente debido a que la actividad deportiva era intensa al igual que la afluencia de turistas y visitantes (Figura 13).

Los indicadores cualitativos medidos durante la competencia 45k señalan que aumentan la susceptibilidad ambiental de las especies vegetales dentro de la ruta. El calzado de montaña usado por los competidores desprende el suelo a un nivel mayor que los zapatos de atletismo, puesto que tienen un tipo de suela especializado para aferrarse al suelo y la fuerza que ejerce el competidor al correr es mayor, ocasionando más compactación y desgaste de la estructura del suelo. La intensidad del pisoteo sobre este ecosistema es alta, porque pasan alrededor de 10 personas en un intervalo menor de 1 hora, dato medido durante el evento.

Con respecto al número de pisadas evaluadas durante la competencia, como se mencionó, 180 al principio y posteriormente de que pasaran 50 participantes incrementó a más de 600, incluyendo personal de logística y visitantes que estaban dentro del PNSC ese día; estos valores señalan que el desgaste del suelo es alto y que la perturbación antrópica a la vegetación aumenta con la incidencia de competencias deportivas o actividades de tipo intensiva.

La poca señalización del camino dificulta seguir la ruta ya marcada y definida con anterioridad, dando lugar a que las personas se salgan del camino y circulen fuera de este,

lo que refleja que la fluctuación del ancho del camino varía considerablemente en tramos donde no existe ningún tipo de señal y en áreas con mayor pendiente.

Los cambios que ocurren en la cobertura vegetal se asocian, sin discusión, a la ruta, y este es un factor determinante en la disminución de la vegetación por ser un elemento que aumenta la susceptibilidad ambiental de estas unidades ecológicas.

Conclusiones y recomendaciones

El tramo de la ruta Mifafí-La Culata presenta puntos de alta fragilidad y sensibilidad ambiental que, al verse sometidos a caminatas y carreras de montaña, modifican la cobertura vegetal y generan el deterioro de los suelos.

Ambientalmente, el área de estudio posee ventajas comparativas en cuanto a cualidades biofísicas (pendiente, unidades geomorfológicas, clima, vegetación y reservorios de agua). Los paisajes son variados y desencadenan diferentes usos donde el turismo es privilegiado, por lo que debe estar condicionado por las normas que rigen la gestión del PNSC, pues el uso protector es el propósito fundamental del mismo.

Según los elementos biofísicos evaluados, los tipos de pendientes permiten definir áreas con acceso fácil o moderado, fuertes y escarpados, en concordancia con las exigencias físicas que se quieren cumplir. Aquellos lugares con poca pendiente, se corresponden con áreas relativamente planas cerca de fondos de valles y en hendiduras del relieve, de acceso fácil generalmente; en zonas con pendiente moderada y fuerte, el acceso es de exigencia física mayor. En pendientes escarpadas, el acceso es limitado y restringido por las laderas, en circos glaciares, crestas, lechos rocosos y laderas escarpadas.

Los elementos relacionados con geomorfología, el clima y la orientación determinan la presencia de la vegetación localizada en ambientes periglaciales. Es de suponer que, en zonas superiores

a los 4.000 m.s.n.m., la vegetación está limitada por estos factores, aunque puede que la misma se haya modificado para adaptarse a esta zona de vida y soportar sus líneas de estrés. La evaluación de las variables biofísicas permitió asociar estos elementos naturales a la baja cobertura vegetal y la disminución de la misma, que unido al turismo y especialmente al deporte, hacen que sea más frágil al ser perturbada, con un nivel de resiliencia ambiental bajo.

Los cambios que se observaron sobre la cobertura vegetal están estrechamente relacionados a la ruta Mifafí-La Culata que, al ser el escenario de competencias deportivas, hacen que constantemente esté sometida a perturbaciones generadas por el pisoteo y compactación de los suelos, que disminuyen directamente la vegetación. El ancho de la ruta demuestra que la cobertura vegetal es menor en zonas escarpadas y con pendientes fuertes, caso contrario de lo que ocurre en áreas de fondo de valle y laderas ligeramente inclinadas, donde llega a valores inferiores de 1 m. Este comportamiento se relaciona con la poca planificación de las actividades desarrolladas en la competencia Mifafí-La Culata, y el bajo mantenimiento y alcance espacial de la señalización. La señalización observada pareciera alcanzar solamente el tramo que se realiza durante la noche, y en general se caracteriza por el bajo mantenimiento.

La categoría "Camino" presenta las áreas con menos cobertura vegetal, en comparación a la categoría "Fuera del camino", en orientación este y oeste, esto pareciera afirmar que el sendero por donde se desarrollan las competencias está constantemente sometido a perturbaciones antrópicas, donde el suelo tiene alto nivel de desgaste y compactación.

Con respecto a los resultados obtenidos, se formuló una propuesta sostenible desde el punto de vista ambiental, considerando criterios generales, donde la ruta es el elemento central multipropósito que se consolida como base para lograr los objetivos planteados.

- Ocasionar el menor impacto a la vegetación y cambio a la cobertura. Se estimó que la cobertura vegetal que está sobre el camino o en áreas próximas es menor, comparado con áreas alejadas, como consecuencia del pisoteo continuo. La compactación del suelo dificulta el desarrollo radicular por falta de aireación y el tiempo de restauración ecológica en la unidad de páramo altiandino es más lenta, y la capacidad de respuesta de la vegetación, ante una perturbación, es baja.
- Considerar las condiciones biofísicas como base para formular un turismo sostenible. Dada la alta fragilidad ecológica propia de las condiciones de las altas montañas de los Andes venezolanos y en particular del PNSC, hacen que los suelos posean una alta susceptibilidad erosiva y que la biota esté en estado de riesgo constante ante actividades antrópicas, creando condiciones de elevada fragilidad, especialmente en altitudes que superan los 4.000 m.s.n.m., en la unidad ecológica de páramo altiandino. Las pendientes que predominan son fuertes y escarpadas, mientras que la geomorfología se asocia a laderas fuertemente inclinadas y escarpadas, constituidas por circos glaciares y crestas y en menor predominio la presencia de laderas ligeramente inclinadas y fondos de valles.
- No crear rutas nuevas. La ruta Mifafí-La Culata ya está establecida y crear senderos alternos o nuevos conlleva una mayor perturbación de la vegetación, causando más impacto a causa de las modificaciones antrópicas que ocasionan las

actividades turísticas o deportivas intensas como caminatas o competencias de montaña.

- Aprovechar eficientemente las bellezas paisajísticas y los valores naturales. La ruta debe funcionar de manera integradora y multipropósito, para un turismo sostenible, aprovechando las unidades de paisaje que se observan, ocasionando los menores impactos a los elementos naturales.
- Obtener el mayor beneficio de un turismo ambientalmente responsable. La ruta es escenario de diferentes unidades geomorfológicas que engloban fondos de valles, circos glaciares, morrenas, divisorias de agua, escalones rocosos, rocas aborregadas, estructuras en forma de lomo de ballenas, picos, picachos y humedales altiandinos que evidencian el modelado glacial de los Andes venezolanos. Una topografía abrupta y escarpada con desniveles continuos, con ciclos diarios de amplitud térmica mayor a 10 °C, presencia de heladas y lluvia en forma de nieve, reflejan la presencia del páramo desértico, fenómeno natural único en el planeta, esta condición endémica y la alta fragilidad ambiental demandan un tratamiento especialmente cuidadoso y responsable al decidir las actividades permisibles, tanto en sus modalidades como en la intensidad de uso.
- Mejorar la señalización de la ruta. La ruta posee señalización escasa y en algunas áreas es inexistente. Una correcta señalización, evitando las áreas más frágiles de ser impactadas, permitiría mitigar las perturbaciones ocasionadas.
- Evaluar la realización de actividades deportivas de alto impacto. La carrera 45k, que se desarrolla anualmente desde el 2014, es una acción deportiva que aumenta las perturbaciones a los ecosistemas, por la alta fragilidad ambiental del área. Este evento deportivo debe ser organizado de manera planificada para que los impactos ocasionados a los ecosistemas sean mínimos y que esta actividad llegue a ser sustentable y sobre todo sostenible para el PNSC.
- Planificación eficiente de las actividades realizadas en la ruta. Las actividades dentro de la ruta Mifafí-La Culata deben ser detalladas y evaluadas previamente para conocer qué perturbaciones genera. Particularmente, en acatamiento del principio legal de prevención, que se efectúen los estudios de capacidad de carga y la evaluación de impacto ambiental correspondiente.

Una reflexión final de este caso de estudio en un parque nacional de Venezuela es que seguramente ilustra la situación de otras áreas de la cordillera de los Andes, donde se presentan desafíos y oportunidades para los administradores de los parques nacionales y el público que los visita. Además, permite tener una mejor comprensión de esta región y contribuir al desarrollo sostenible.

Referencias

- Aldana, A. y Bosque Sendra, J. (2008a). Cartografía de la cobertura/uso de la tierra del Parque Nacional Sierra de La Culata, Estado Mérida-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana* 49(2), 173-200.
- Aldana, A. y Bosque Sendra, J. (2008b). Evaluación de la Zonificación de Uso del Parque Nacional Sierra de La Culata. Mérida-Venezuela. *Revista Forestal Latinoamericana* 23(1), 9-34.

Figura 13 - Cantidad de huellas antes y después de que pasaran 50 participantes de la competencia 45k



Fotografías de Díaz, febrero de 2020.

- Ataroff, M. y Sarmiento, L. (2003). Diversidad en los Andes de Venezuela. I. Mapa de unidades ecológicas del estado Mérida. CD-ROM, Caracas.
- Ayube, M. (2011). *Las zonas protectoras dentro del sistema venezolano de áreas naturales protegidas* [Tesis de Doctorado en Ciencias, Universidad Central de Venezuela].
- Buitrago, E., Aranguren, A. y Marquina J. (2012). Determinación de cambios en la cobertura vegetal del cerro El Morro, parroquia Mucurubá, Mérida-Venezuela. *Revista Forestal Latinoamericana* 26 (2), 85-106.
- Comisión de Medio Ambiente y Desarrollo de América Latina y el Caribe. (1996). *Amanecer en Los Andes*. CAF, BID, PNUD. <https://www.un.org/ungifts/es/amanecer-en-los-andes>
- Díaz, I. 2021. *Cambios en la cobertura vegetal como consecuencia de la actividad turística en un tramo de la ruta Mijoff-La Culata, Parque Nacional Sierra de La Culata, Mérida, Venezuela* [Trabajo Especial de Grado de Geografía, Universidad de Los Andes].
- Escobar-Mamani, F., Branca, D. y Haller, A. (2020). Investigación de montaña sobre y para la región andina. *Revista de Investigación Altoandina* 22(4), 311-312.
- Llambí LD, L. Sarmiento, F. Rada. (2013). La evolución de la investigación ecológica en los páramos de Venezuela: múltiples visiones de un ecosistema único. Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE), Universidad de los Andes.
- Llambí, L.D, Smith, J. y Silva, B. (2006). *Uso de la tierra y conservación de la diversidad en el páramo venezolano: diseño participativo de planes locales de manejo en áreas protegidas*. Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE), Universidad de Los Andes.
- Marrero, C. (2018). *Introducción a los humedales altoandinos de Venezuela*. Programa de Recursos Naturales Renovables de la Universidad de los Llanos Ezequiel Zamora "UNELLEZ" Guanare estado Portuguesa, Venezuela. https://www.academia.edu/35797165/INTRODUCCI%C3%93N_A_LOS_HUMEDALES_ALTOANDINOS_DE_VENEZUELA_por_CR%C3%8DSPULO_MARRERO_ISBN
- Merida Running (s.f). Inicio [Página de Facebook]. Facebook. 15 de agosto de 2024 de <https://www.facebook.com/meridarunning/?ref=ts>
- Monasterio, M. (1979). El páramo desértico en el altandino de Venezuela. En M. Salgado-Labouriau (Ed), *El Medio Ambiente Páramo. Actas del seminario de Mérida -Venezuela*. Ediciones Centro de Estudios Avanzados.
- Monasterio, M. (1980). Las formaciones vegetales de los páramos de Venezuela. En: M. Monasterio (Ed), *Estudios Ecológicos en los Páramos Andinos* (pp. 93-158). Editorial de la Universidad de Los Andes.
- Monasterio, M. y Molinillo, M. (2003). La integración del desarrollo agrícola y la conservación de áreas frágiles en los páramos de la Cordillera de Mérida, Venezuela. *Congreso Mundial de páramos, Tomo II*. Paipa, 734-749.
- Organización Mundial del Turismo. (1999). *Guía para administraciones locales: desarrollo turístico sostenible*. OMT.
- Oyola, A. (2009). *Heterogeneidad de la vegetación en un paisaje de origen glacial en el páramo de Las Cruces, Sierra de La Culata, Mérida, Venezuela* [Trabajo Especial de Grado de Magíster en Ecología Tropical, Universidad de Los Andes].
- Potentini, M. (2008). *Caracterización briofítica de humedales del Valle de Mijoff, Mérida Venezuela*. Postgrado en Botánica Taxonómica Neotropical. Universidad de Los Andes.
- Rincón, J., Matos, F., Sulbarán, E. y Zambrano, G. (2007). *Parques Nacionales del estado Mérida: aventura y conocimiento*. Editorial Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología – Fundación BIOANDINA de Venezuela Litorama.
- Salas, N. (2003). "Del frailejón a la papa... entre la conservación y la agricultura" Maximina Monasterio. Una apuesta permanente por el reencuentro entre ecología y sociedad en el escenario de los páramos andinos. *Fermentum. Revista Venezolana de Sociología y Antropología* 13(36), 153-173.
- Sánchez, G. (2016). *La Sierra de Santo Domingo: reconstrucciones biogeográficas para el cuaternario de una antigua cadena montañosa nevada* [Trabajo Especial de Grado de Geógrafo, Universidad de Los Andes].
- Sarmiento, L., Llambí, L.D, Escalona, A. y Márquez, N. (2003). *Vegetation patterns, Regeneración Rates and Divergence in an Old-field Succession of the High Tropical Andes*. Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE), Universidad de los Andes.
- Schubert, C. y Valastro, S. (1973). *Páramo de La Culata estado Mérida. Glaciación del pleistoceno perdida. Boletín informativo*. Asociación de minería y petróleo. Vol.16.
- Schubert, C. y Vivas, L. (1993). *El Cuaternario de la Cordillera de Mérida. Andes venezolanos*. Universidad de los Andes - Fundación Empresas Polar.
- Vicén, J, Garrigos, J., Millán, C. y Martín, J. (2013). *La biomecánica y la tecnología aplicadas al calzado deportivo*. Universidad Camilo José Cela.



Trazando la evolución de Girardot: un estudio de morfología urbana asociada a ciclos económicos y sociales

Tracing the Evolution of Girardot: A Study of Urban Morphology associated with Economic and Social Cycles

Diego Javier Gómez¹ 
Andrés Felipe Pulido Otalora² 
Juan Sebastián Rodríguez López³ 
Johan Sebastián Yazo Moreno⁴ 

Resumen

La morfología urbana estudia la forma y estructura de las ciudades, así como los procesos que dan forma a sus paisajes urbanos. Dentro de sus contribuciones se encuentra la posibilidad de construir una historia de las ciudades que, desde la interdisciplinariedad de saberes como el urbanismo y la geografía urbana, identifique y preserve áreas de valor histórico y arquitectónico, así como promover un sentido de identidad local. El trabajo tiene como objetivo comprender las variaciones con que se ha transformado el espacio en la ciudad de Girardot en sus dimensiones históricas, sociales y económicas, a través de la periodización de ciclos económicos y sociales. El estudio se basó en un enfoque cualitativo en el que se recopiló información de diversas fuentes, incluyendo datos abiertos, información oficial de entidades locales, fotografías aéreas, imágenes satelitales y planos de la ciudad. Además, se realizaron visitas de campo para contrastar la información recopilada y comprender el uso actual de los espacios trabajados. Se reconoce que la forma urbana contemporánea de Girardot es el resultado de condiciones socioeconómicas coyunturales, pero también refleja elementos estructurales que se han desarrollado a lo largo de distintas etapas de la ciudad.

Palabras clave:

ciclos económicos, Girardot, morfología urbana, paisaje, urbanismo.

Cómo citar

Gómez, D. J., Pulido Otalora, A. F., Rodríguez López, J. S. y Yazo Moreno, J. S. (2024). Trazando la evolución de Girardot: un estudio de morfología urbana asociada a ciclos económicos y sociales. *Análisis Geográficos*, 57 (1), 156 - 159.

1. Universidad Nacional de Colombia. Correo: djgomezmu@una.edu.co. ORCID:
2. Universidad Nacional de Colombia. apulido@una.edu.co. ORCID:
3. Universidad Nacional de Colombia. srodriguezlo@una.edu.co. ORCID:
4. Universidad Nacional de Colombia. jyazo@una.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8089-2474>.

Abstract

Urban morphology studies the form and structure of cities, as well as the processes that shape their urban landscapes. Among its contributions is the possibility of constructing a history of cities that, from an interdisciplinary perspective drawing on fields like urban planning and urban geography, identifies and preserves areas of historical and architectural value, while promoting a sense of local identity. This work aims to understand the variations in which space has been transformed in the city of Girardot in its historical, social, and economic dimensions, through the periodization of economic and social cycles. The study was based on a qualitative approach that collected information from various sources, including open data, official information from local entities, aerial photographs, satellite images, and city plans. In addition, field visits were conducted to verify the collected information and understand the current use of the spaces studied. We acknowledge that the contemporary urban form of Girardot is the result of current socio-economic conditions, but it also reflects structural elements that have developed over different stages of the city's history. The study of the synergy, in terms of inputs and methodologies used, to obtain potential scenarios of use.

Keyword:

Economic cycles, Girardot, urban morphology, landscape, urban planning.

Introducción

Girardot es uno de los 116 municipios del Departamento de Cundinamarca, se encuentra ubicado entre la cordillera central y occidental, en un estrecho del río Magdalena, estas características lo convirtieron en un importante puerto durante la colonia. Además, la construcción del ferrocarril durante la década de los ochenta del siglo XIX lo llevó a convertirse en un importante centro comercial regional. En la actualidad la vocación económica de Girardot es el turismo, hecho que se evidencia con el boom en la construcción de distintos clubes vacacionales, conjuntos residenciales y demás espacios destinados al turismo que se ha dado durante los últimos 30 años.

Esta investigación pretende usar los planteamientos de la geografía urbana y el urbanismo con el fin de identificar las características morfológicas presentes en la forma urbana, la expansión y en el trazado de las vías del municipio de Girardot, esto a través del análisis historiográfico de ciclos económicos que la ciudad ha vivido (Martínez y García, 2000). Las discusiones en torno al crecimiento y el estudio de la forma de las ciudades han cobrado popularidad debido al constante crecimiento de las urbes a nivel global "el mundo en sí mismo está siendo convertido en una ciudad" (Brugmann, 2009, p. 185). Otro título que ha recibido este tema de investigación es: *Las formas de crecimiento urbano* (Solá-Morales i Rubio, 1997), según este trabajo la morfología urbana es un campo interdisciplinario que reúne elementos de la arquitectura, la geografía, la sociología y la historia para comprender cómo las ciudades se ordenan y transforman, aquí se analizan las relaciones entre las distintas formas físicas de la ciudad y la influencia de sus contenidos sociales en la geometría de las mismas.

Hasta este punto se ha visto cómo los cambios sociales, políticos y económicos se expresan tanto en la arquitectura como en la forma de los límites de la ciudad, en esta medida, se considera esencial el ejercicio historiográfico que busca identificar las transformaciones y los motivos que llevaron a Girardot a tener el aspecto que hoy tiene.

Metodología

Se realizó una comparación entre los diferentes perímetros o límites que ha tenido la zona urbana de Girardot en diferentes momentos del siglo XX. optando por un modelo de investigación cualitativo, que permitió contemplar el paisaje urbano desde las posibilidades de transformación, tanto en la forma y geometría (arquitectura) como en la vocación y uso del suelo, esto según las configuraciones sociales de cada periodo histórico. Con el fin de establecer los periodos temporales que manejaría este trabajo se procedió a trabajar con base a ciclos histórico-económicos basados en las investigaciones de Aragón Reyes (2006, p. 12), Echeverry y Suarez (2020), Martínez y García (2000) y Velandia (2002).

Dentro del abordaje metodológico en trabajos de morfología urbana Barros y Ezquiaga (2019) recomiendan hacer uso de datos abiertos e información oficial dispuesta por distintas entidades. En este sentido, se realizó una revisión de fotografías aéreas proporcionadas por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), imágenes satelitales de Google Earth y consultas de distintos planos de la ciudad de Girardot, los cuales están disponibles en el archivo de la alcaldía municipal de Girardot. La información de archivo se contrastó mediante visitas a campo con las que se pudo reconocer el uso actual de los espacios y comprender la historia de la ciudad. La categorización de las formas presentes en el plano urbano de Girardot se hizo según la forma que los cortes de las calles y carreras producía; esto con base a la metodología y categorías de análisis propuesta en el artículo *Guía de clasificación morfológica de zonas urbanas a partir de sensores remotos*, el resultado de esta clasificación se encuentra en la Figura 1.

En este sentido "la forma urbana contemporánea es, coyuntural en tanto refleja las condiciones momentáneas de la estructura socioeconómica, pero de otra parte expresa los elementos estructurales forjados a lo largo de las diferentes etapas evolutivas de la ciudad" (Montoya Garay, 2005, p. 3), es decir, la forma que las ciudades presentan en la actualidad son el resultado de distintos momentos históricos y políticos que en su construcción han intervenido.

Morfología Urbana

Durante las últimas décadas, el mundo ha experimentado un crecimiento general de las ciudades, según la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2018) Hoy en día, el 55% de la población mundial vive en zonas urbanas, proporción que puede aumentar hasta el 68% en 2050. En este sentido, los estudios en geografía urbana se han interesado por estudiar la relación entre la evolución histórica, la forma de las ciudades y los efectos ambientales que generan estos procesos.

La morfología urbana es un campo de estudio dentro de la geografía y el urbanismo que se puede definir como “el estudio de la forma física de las ciudades” (Olivera, 2016, p. 2), particularmente, los estudios de morfología urbana se enfocan en el tejido urbano y su relación con el contexto histórico, social y económico en el que la ciudad nace y se desarrolla. Bosselman (2008, p. 193) señala que la investigación en morfología urbana “estudia la forma y la evolución histórica del tejido urbano, sus edificios, los determinantes naturales y los procesos que lo transforman”.

En este sentido, la relación historia-ciudad es fundamental para los estudios en urbanismo ya que las formas y estructuras que están presentes en el espacio reflejan que “los procesos sociales operan en un tiempo y lugares particulares en otro. El resultado es un espacio urbano constituido como un palimpsesto, una serie de capas conformadas y construidas en diferentes momentos históricos superpuestas una sobre otra” (Harvey, 1997). Otros teóricos en urbanismo como Horacio Capel han señalado que la ciudad es la “forma más excelsa de paisaje cultural, reflejo de la organización económica, política y social” (2002, p.19). Además, Capel añade que el contexto temporal es inherente a todo elemento y no se debe hacer omisión del marco histórico en el que se desarrolla el crecimiento urbano.

También han sido desarrollados trabajos enfocados a estudiar aspectos de morfología urbana en centros poblados ubicados en América del Sur, por ejemplo, el artículo *Aspectos de morfología urbana y diferencias. Cuestiones socio espaciales en el espacio urbano del municipio de Álvarez Machado, São Paulo, Brasil* (Trombeta y Soares, 2015), aquí además de las relaciones entre los usos del suelo y la disposición de los edificios en la ciudad se presta especial atención a las diferencias socioespaciales presentes en el espacio urbano, lo que incluye la formación de comunidades irregulares cerca de condominios de lujo y los loteamientos “conjuntos” cerrados.

Un ejemplo de investigación de morfología urbana aplicada en Colombia es el estudio de Carlos Andrés Ochoa (2009), con su artículo *Cambios en la morfología urbana de Yolombó*. En este artículo se realiza un análisis de los momentos históricos, hitos económicos (como la construcción del ferrocarril) y accidentes geográficos que influyeron en la forma y crecimiento del área urbana de Yolombó, este municipio cobró importancia como lugar de paso entre las ciudades de Medellín, Remedios y Puerto Nare, lo que provocó que la estructura urbana se enfocara en atender las necesidades de los viajeros como algunas bodegas para las cargas y posadas. El trabajo llega a la conclusión de que esta urbe obedece a un modelo de urbanización globular limitado por las cuchillas de disección sobre las que se ubica la ciudad, que además ha tenido un crecimiento poblacional lento durante las últimas décadas producto de la violencia que se vivió en la región.

En relación a los estudios en temas de urbanismo realizados en Colombia, se encuentra la investigación, *De la ciudad hidalga a la metrópoli globalizada, una historiografía urbana y regional de Bogotá* de Montoya Garay (2018). Es un trabajo en donde se analiza la configuración de la ciudad entre el año 1538 y la primera década del 2000, en el que además de examinar el rol de la ciudad como punto principal en una red nacional de ciudades, da a entender que en la comprensión de la morfología de una ciudad es necesario conocer su historia,

la forma urbana contemporánea es, de un lado, coyuntural en tanto que refleja las condiciones momentáneas de la estructura socioeconómica; pero, de otra parte, expresa los elementos estructurales forjados a lo largo de las diferentes etapas evolutivas de la ciudad y que constituye la base, la plataforma de la actual estructura urbana (Montoya Garay, 2018 p. 3).

Clasificación morfológica según geometría

Para estudiar la morfología urbana de Girardot se decidió trabajar con la *Guía de clasificación morfológica de zonas urbanas a partir de sensores remotos* de Castro Lozano y Vargas (2009). Se trata de una metodología establecida lo que garantiza que el análisis se realice de manera consistente y rigurosa. Al haber sido desarrollada por investigadores locales, la guía está adaptada a las características y particularidades de las zonas urbanas en Colombia. Esto es especialmente relevante para Girardot, ya que permite una aplicación más precisa y contextualizada.

Incluye el uso de tecnología de sensores remotos, lo cual permite obtener datos precisos y actualizados sobre la morfología urbana. Esta tecnología facilita el análisis de grandes áreas con alta resolución y en menor tiempo comparado con métodos tradicionales.

Esta guía se usó para interpretar las geometrías presentes en el casco urbano de Girardot y realizar el mapa de la morfología (Figura 1). En el caso de la “geometría del contorno urbano las formas se pueden caracterizar de la siguiente manera: circulares u ovaladas, alargadas, irregulares y rectangular” (Castro Lozano y Vargas, 2009, p. 11) con esta clasificación se procedió a establecer cuales geometrías están presentes en la ciudad, su tamaño, porcentaje de ocupación con respecto al área de la ciudad, distribución y su respectiva georreferenciación. Se identificaron y clasificaron las formas urbanas predominantes. Seguido de esto, se propuso un esquema de criterios de clasificación tales como geometría, estructura y texturas urbanas, para luego relacionarlos con los aspectos naturales, socioeconómicos y culturales, los cuales influyen sobre la morfología urbana (Castro Lozano y Vargas, 2009).

A continuación, se presenta el análisis de las formas urbanas identificadas y clasificadas de la ciudad de Girardot:

- Alargado: son formas alargadas sobre un eje (Figura 2), están presentes mayoritariamente dentro de las actuales zonas de expansión de la ciudad, estos se deben a que es la forma que adoptaron los conjuntos residenciales y edificios que se construyeron después de 1980.

- Circular: representa un patrón geométrico sin ángulos, en el que se encuentran formas circulares, principalmente dentro del conjunto el Peñón en donde se adoptó este patrón por sus geofor-

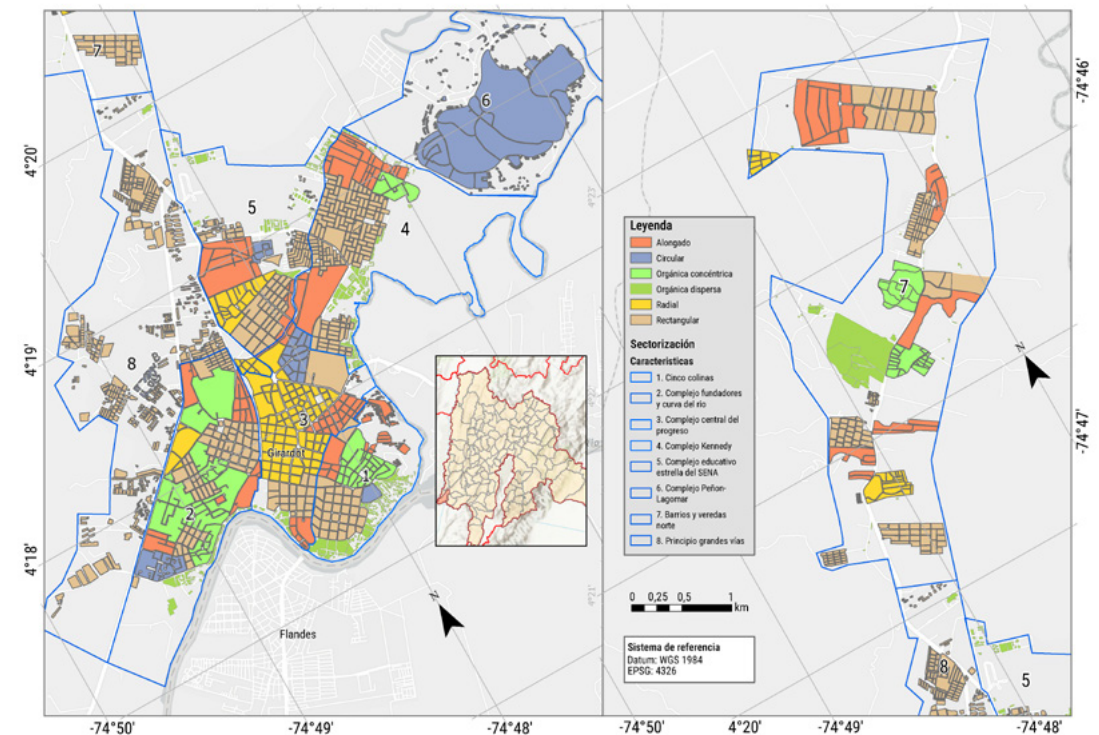


Figura 1 - Morfología urbana de Girardot 2023

mas heredadas, debido a una cubeta de inundación perteneciente al río Bogotá, donde se convirtieron en lagunas circulares con el proyecto urbanístico. Asimismo, este patrón está localizado en las inmediaciones de glorietas (El Leoncito de Girardot), esto hace que el uso de estas zonas sea mixto dada la presencia de locales comerciales en los primeros niveles y uso residencial en los últimos.

- Orgánica concéntrica: este presenta calles dispersas sin conexiones específicas, aunque con una forma concéntrica; dichas formas respetan la dirección de las calles hacia el río, lo que les da orden a las cuadras y manzanas, aunque no genera una geometría particular. Los usos de las zonas clasificadas en esta categoría son diversos: entretenimiento estadio municipal, piscinas), conjuntos residenciales y viviendas de diversos periodos.

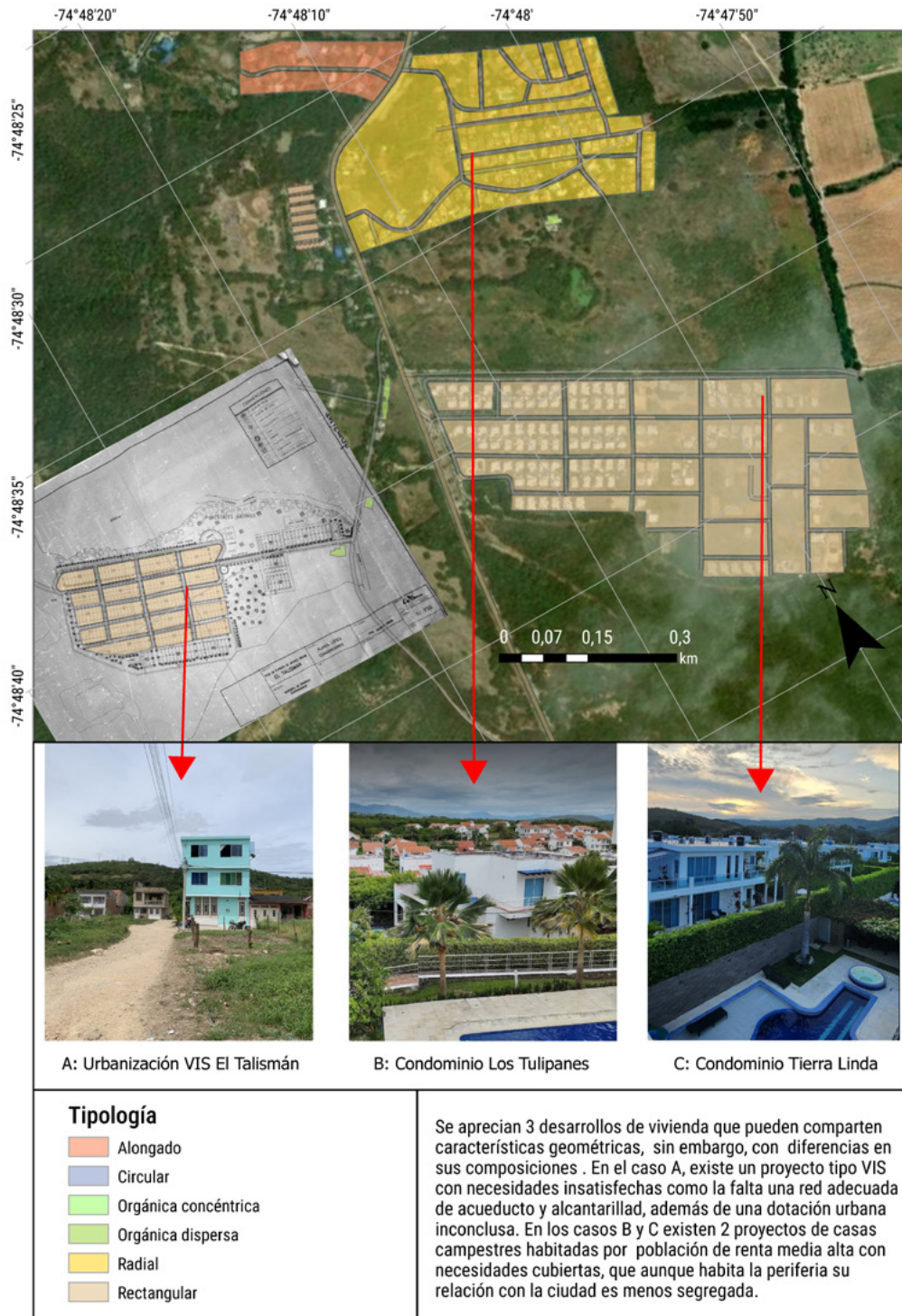
- Orgánica dispersa: se refiere a un entrelazado de calles sin ninguna dirección y orden específico, en este patrón se evidencia

ausencia de planificación. Su presencia se distribuye sobre los barrios ubicados en la ribera del río, parte del barrio Buenos Aires y algunos de los nuevos desarrollos urbanísticos dispersos ubicados hacia la periferia norte de la ciudad.

- Radial: está relacionada con el crecimiento urbano que se desprende de un eje o radio principal hacia diversas direcciones, su mayor presencia se encuentra en el centro de la ciudad en inmediaciones del Parque Central y el Parque Sucre, estos lugares presentan un alto flujo de tráfico por lo que su principal uso es comercial.

- Rectangular: se caracteriza por presentar formas rectangulares con distribución en toda la ciudad, su aparición dentro del primer eje de expansión es herencia del estilo arquitectónico colonial o cuadrícula española. Este patrón estuvo ausente en la expansión de la ciudad férrea, pero se retoma en los proyectos de vivienda como Tierra Linda.

Figura 2 - Morfología urbana de Girardot: contraste de tipologías

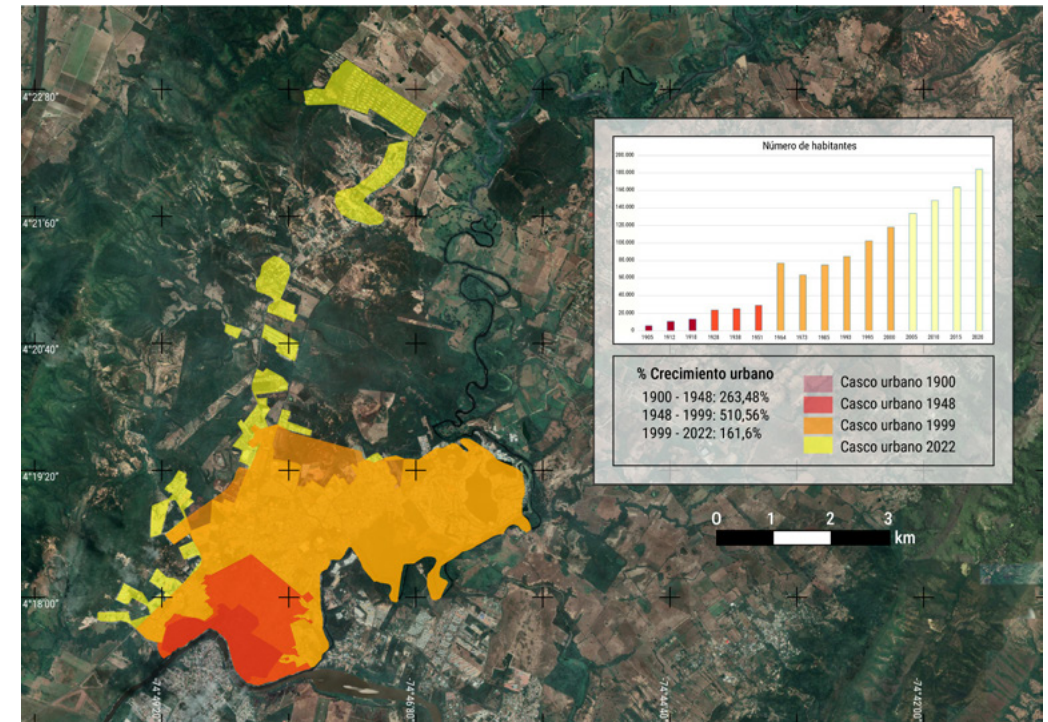


Crecimiento urbano a partir de ciclos

Girardot ha vivido los siguientes momentos históricos y ciclos económicos que determinaron cambios urbanísticos en la ciudad. Estos están categorizados por: (i) la ciudad puerto y bonanza del ferrocarril (1910-1950) (Figura 5) donde la actividad de los puertos y la actividad comercial del río Magdalena marcó el eje de expansión de la ciudad; (ii) la industrialización de la ciudad (1950-1970) en el que la ciudad inicia su crecimiento hacia el norte debido a la construcción de las estaciones del ferrocarril; y (iii)

la ciudad moderna (1970-2000), en donde tras la decadencia del ferrocarril en Colombia, Girardot adopta una economía basada en el turismo, con una tendencia hacia construir condominios o conjuntos residenciales (Figura 3). Se reconoce en estos ciclos, periodos en los que la ciudad experimentó transformaciones significativas, alterando tanto la organización geométrica como la vocación del suelo. Aunque la geometría del entorno puede permanecer estática durante largos periodos, la dinámica de los espacios revela una renovación constante de las personas que los habitan.

Figura 3 - Crecimiento urbano Girardot (1900-2022)



Fuente: elaboración a partir de Instituto Geográfico Militar y Catastral, 1943; Martínez y García, 2000.

Bonanza del ferrocarril e industrialización 1910-1950

El proyecto de construcción del ferrocarril, que se inició en 1883 y se completó en 1909 (Tabla 1), abarcó una serie de trabajos que incluyeron la excavación y nivelación del terreno, la construcción de puentes, túneles y viaductos, así como la instalación de rieles y la edificación de estaciones junto a sus terminales. Este hito fue fundamental para Girardot, pues facilitó el transporte de pasajeros y mercancías entre ciudades clave como Bogotá y Medellín, impulsando así el desarrollo económico y social de la región. Además, promovió el comercio y el turismo, lo que contribuyó al crecimiento de la industria tabacalera en municipios

como Ricaurte. El auge de la navegación en el río atrajo una ola de migración hacia los puertos, generando una demanda creciente de espacios y servicios tanto para viajeros como para trabajadores.

Tabla 1 - Tramos construidos del ferrocarril 1883-1909

Tramo construido	Kilómetros construidos	Año de terminación
Girardot - Tocaima	28	1883
Tocaima - El Portillo	3	1886
El Portillo - Juntas de Apulo	8	1888
Juntas de Apulo - Anapoima	12	1899
Anapoima - San Joaquín	7	1905
San Joaquín - La Mesa	14	1905
La Mesa - El Hospicio	5	1906
El Hospicio - Km 97	20	1906

Tramo construido	Kilómetros construidos	Año de terminación
Km 97 - Facatativá	34	1906
Total	131	

Fuente: Martínez y García, 2000.

Dentro de los principales hitos urbanísticos durante este periodo se encuentra la creación del “Camellón del Comercio” (actual calle 16; Figura 4), el cual fue un centro de actividad comercial. La orientación de esta calle permite ver la necesidad que tenía la ciudad de una infraestructura vial paralela al río Magdalena y cuyo eje de expansión seguía la dirección del mismo recorrido fluvial, además, este camellón conectaba la Plaza Sucre y la Estación con el ferrocarril⁵.

En el crecimiento de la ciudad también influyó la ubicación espacial de esta y el avance de las diferentes vías que comunican a Bogotá con el exterior, en este sentido se considera a Girardot como un “cruce de caminos”. Según Martínez y García (2000), esta descripción está influenciada por haber sido un centro de integración con los mercados regionales e internacionales. Durante el siglo XIX no se contaba con una conexión decente por tierra: la vía principal atravesaba Ricaurte, sin embargo, dentro de los factores que hicieron que los planes viales se enfocaran hacia Girardot estuvieron influenciados por la presencia de canteras que facilitaron la construcción de esta vía; además, es la ruta entre Bogotá y el Magdalena con menor desnivel, situación que abarata costos en transporte.

Cabe resaltar que el río Magdalena se estrecha a la altura de Girardot, por ello se ahondaron esfuerzos para la construcción de un puente capaz de cruzar entre dos peñones el imponente río (Roldan, 1858). Así entonces, la imperativa necesidad de una conexión terrestre entre el Tolima y Cundinamarca llevó a construir el puente real en 1930 (Figura 6), siendo instaurado en

5. El plano más antiguo encontrado es de 1943, el cual fue georreferenciado, sin embargo, se pudo establecer el límite urbano de la ciudad de 1900, a través de una interpretación de un croquis encontrado en (Martínez, 2000).

sus primeros años un peaje e impuesto al tránsito de mercancías. Por estos motivos, Girardot obtendría una importancia nacional, siendo de tránsito obligatorio en la conectividad del centro del país y en la movilización de personas y mercancías.

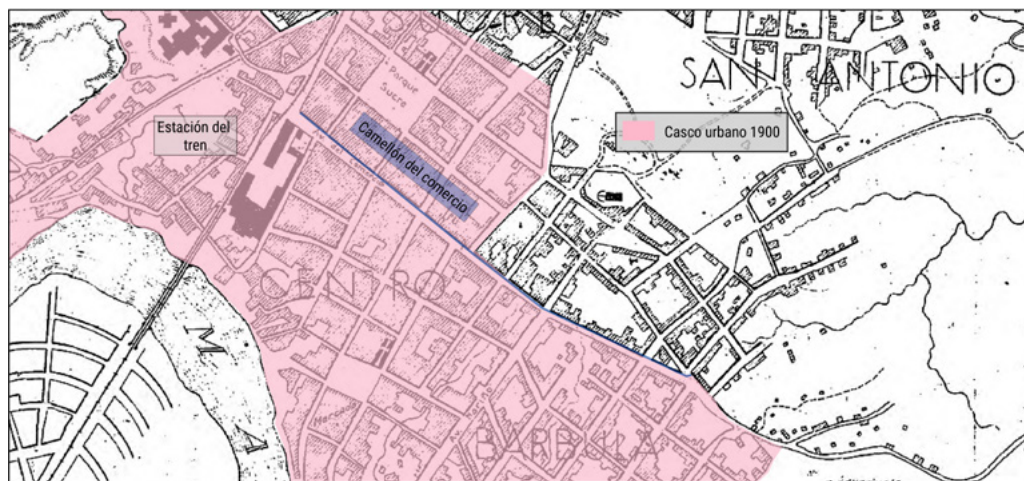
Al comparar ambas fotografías (Figura 6) en la actualidad existe un uso principalmente turístico, se cuenta con un muelle desde el que se realizan pequeños recorridos sobre el río. La Figura 6 demuestra, cómo para 1930, el hito de las locomotoras era todo un espectáculo, atrayendo la atención de sus pobladores. Esta comparación visual resalta la importancia de la infraestructura en su época de esplendor y cómo el paso del tiempo y los cambios en los medios de transporte han llevado al desuso y eventual abandono de este elemento histórico.

Desuso, decadencia del Ferrocarril e instauración del turismo 1950 - 1970

Dentro de los hechos que influenciaron el crecimiento de la ciudad se encuentran la amplia oferta de ferias y festivales que surgieron a partir de 1950 como la Feria Artesanal, el Festival del Turismo y el Festival del río. Las ferias y festivales, en palabras de Ortiz y Pinilla (2020), “la actividad comercial ha desempeñado un papel imprescindible en la economía de la ciudad. Para 1968, existían 1501 establecimientos comerciales e industriales de los cuales en 1967, 83 de ellos se dedicaban a la industria manufacturera” (p.85). A esto se debe añadir que la mayor parte del casco urbano era ocupado por viviendas por esta época lo que generó un aumento de la demanda en este sector, además se inició la construcción de la casa cultural, el estadio, la catedral y la planta de dependencias del acueducto de Girardot.

En términos generales, a medida que se desarrollaron mejores vías de comunicación terrestre y se construyeron más aeropuertos, el transporte de pasajeros y mercancías por ferrocarril se volvió menos atractivo, en comparación con el uso de automóviles.

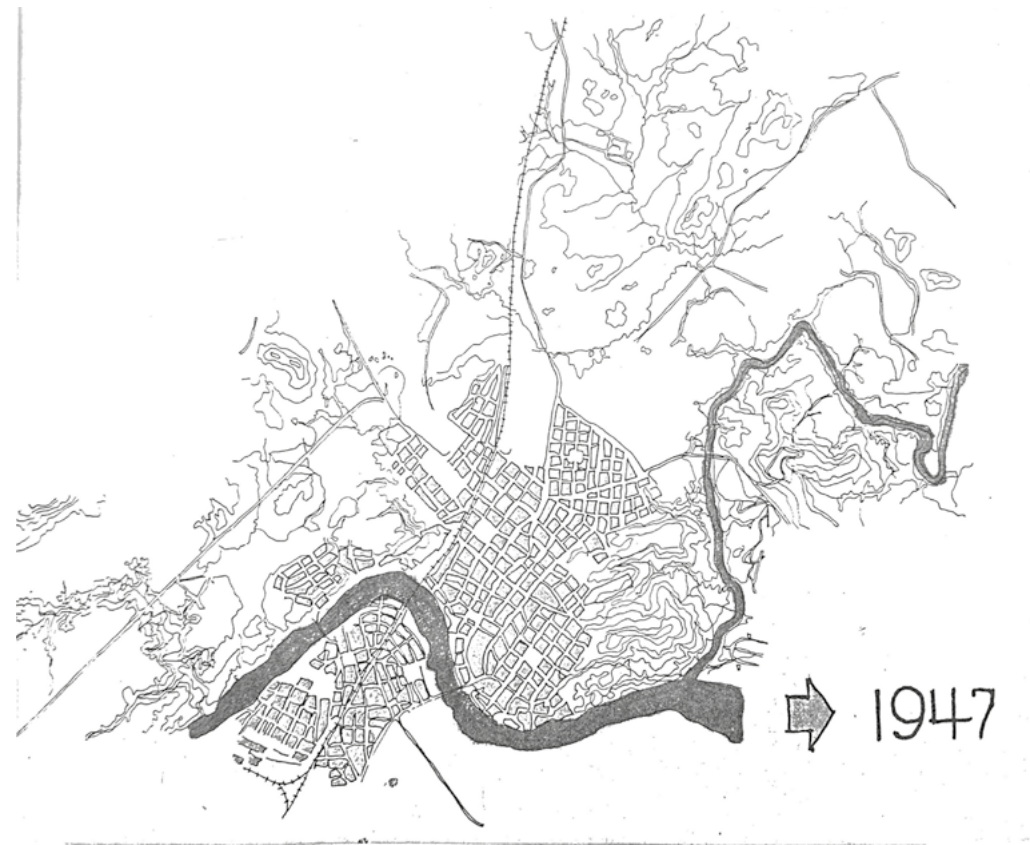
Figura 4 - Representación del “camellón del comercio” y perímetro urbano de 1900



Fuente: elaboración a partir de Instituto Geográfico Militar y Catastral, 1943.

Nota: el mapa base corresponde al plano de Girardot de 1943.

Figura 5 - Plano de la ciudad de Girardot 1947



Fuente: Banco de la República, 1978.

Figura 6 - Vista del puente férreo en 1930 y en 2023



Fuente: Biblioteca Luis Ángel Arango, 2005-2006. Fotografía de Gómez, abril de 2023.

Nota: a la izquierda, vista del puente férreo, 1930; a la derecha, vista actual del puente férreo, 2023.

Esto, sumado a la falta de inversión y mantenimiento que también contribuyó al declive del ferrocarril en Girardot y en otros lugares del país, que, con el tiempo, muchas de sus líneas férreas fueron cerradas o abandonadas y el fundamento de abandonar el proyecto ferroviario del país se argumentó desde una supuesta rentabilidad negativa y un alto costo de mantenimiento. En el caso específico del ferrocarril en Girardot, la línea dejó de funcionar como servicio de transporte de pasajeros en la década de 1970, y posteriormente se redujo el servicio de transporte de carga. A esto mismo, como se observa en la Figura 8, hasta 1952 hubo un constante crecimiento en el transporte férreo, a partir de entonces, la década de los sesenta representó la decadencia de la institución pública Ferrocarriles Nacionales, reflejado en la caída abrupta del transporte de carga y pasajeros que ahora se transportan vía terrestre por carreteras.

Conjuntos y condominios cerrados, 1980 - 2023

Aproximadamente desde la década de los ochenta, en el municipio de Girardot se inició una tendencia urbanística enfocada en la construcción de conjuntos residenciales y condominios cerrados, impulsando la expansión urbana en proyectos de agrupaciones residenciales con propiedad horizontal. En un principio los conjuntos residenciales buscaron resolver dilemas complejos, propios de las ciudades como las limitaciones espaciales en su crecimiento del casco urbano además de poder garantizar la seguridad de sus usuarios y que, mediante una seguridad privada, vivir bajo estándares de tranquilidad. Asimismo, la organización interna de cada conjunto iba progresando en el sentido de mayores dotaciones y ampliaciones de zonas comunes, elementos que de una u otra forma mejoraron la calidad de vida de sus residentes al tener a su disposición servicios como piscinas, canchas deportivas mejor equipadas, gimnasios, entre otros.

Quizás el ejemplo de conjunto privado con mayor relevancia en la ciudad sea el condominio el Peñón (Figura 9). Aquí se adecuaron cientos de hectáreas lacustres, inundables, construyendo enormes

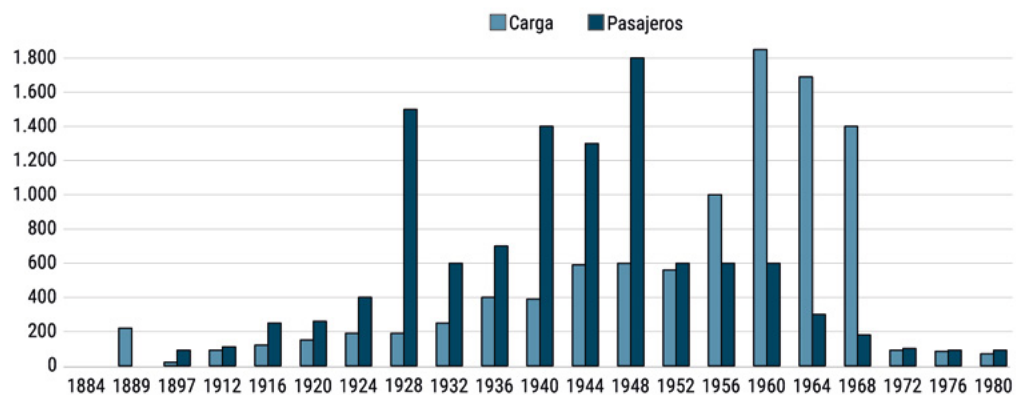
lagunas artificiales en las que se pueden practicar deportes acuáticos. El caso del Peñón ilustra cómo los conjuntos residenciales se establecen en las periferias urbanas, una tendencia influenciada por fuerzas centrífugas de crecimiento urbano. Estos desarrollos, que no consideran la distancia o conectividad con el centro de la ciudad, ofrecen internamente todas las comodidades y servicios que tradicionalmente solo se encontraban en el núcleo urbano.

Esta estrategia se fundamenta en la teoría de las fuerzas centrífugas, como lo señalan Ceballos Álvarez, Ochoa García y Pérez Cruz en su artículo *La geografía económica y los determinantes de la localización industrial* (2006). Estas fuerzas explican la forma en la que factores como la congestión, los altos precios del suelo y la búsqueda de un entorno más tranquilo y espacioso impulsan a algunos residentes a trasladarse hacia las afueras de la ciudad. Así, los conjuntos residenciales en las periferias se convierten en autónomos, ofreciendo una gama completa de servicios y comodidades, desde centros comerciales hasta instalaciones recreativas y educativas, reduciendo la necesidad de viajar al centro de la ciudad para satisfacer las necesidades básicas y de entretenimiento. Este tipo de desarrollo urbano atrae a residentes de alto poder adquisitivo quienes buscan un entorno tranquilo y exclusivo para vivir.

A partir de la observación de imágenes satelitales, fotografías aéreas y lo identificado en campo se logró analizar que a través del tiempo se ha configurado un crecimiento morfológico urbano de tipo radial dada la geometría de los lagos y canchas de golf allí presentes. Asimismo, la delimitación de los inmuebles se ha definido en razón y contigüidad a las formas curvas y circulares de estos cuerpos de agua y zonas verdes.

Esta expresión urbanística no solo responde al aumento de la población y la consecuente demanda de propiedades residenciales y servicios adicionales, como se había mencionado anteriormente, sino que también se ve impulsada por una tendencia particular. Esta tendencia se caracteriza por la adquisición de segundas residencias por parte de personas que no son residentes del municipio, pero sí viven en ciudades cercanas. Este fenómeno es más común entre personas de la tercera edad y pensionadas, que buscan tener una casa adicional para el ocio y el descanso junto a sus familias.

Figura 8 - Transporte de carga (miles de toneladas) y pasajeros (número de pasajeros) en el ferrocarril de Girardot (1884-1980)



Fuente: elaborado a partir de Martínez, 2008.



Figura 9 - Comparación de imágenes satelitales del conjunto residencial el Peñón

Fuente: Google Earth, 2023.

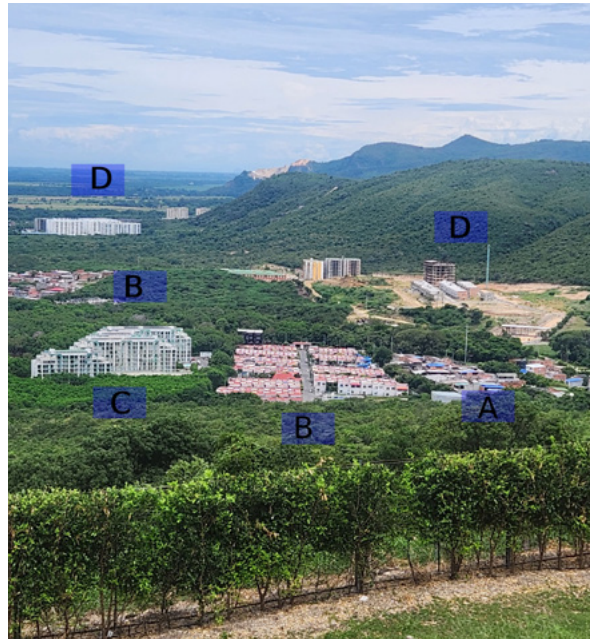
Variación en construcción de acuerdo a temporalidades

La Figura 10 refleja la diversidad en la construcción urbana, desde la autoconstrucción hasta los conjuntos residenciales de gran altura. Esta variedad revela la dinámica social y económica de la zona, donde las necesidades individuales moldean la morfología urbana. Aunque los proyectos grandes predominan, la persistencia de la autoconstrucción muestra la coexistencia de diferentes formas de poblamiento, enriqueciendo la diversidad y complejidad del entorno urbano.

En la figura se pueden observar la autoconstrucción, loteo de 6 x 12 m (A), las primeras casas unifamiliares en conjuntos residenciales (B), un conjunto residencial de apartamentos de 6 pisos de altura (C), conjuntos residenciales de propiedad horizontal de altura mayor a 15 pisos (en construcción) (D), esta última es la tendencia dominante en el periodo más reciente en el urbanismo de la zona.

En este último periodo hay un crecimiento rápido y variado que ha dependido del poder adquisitivo y formas de vida de los ciudadanos, sin embargo, gran parte de la población que no tiene las posibilidades de acceder a créditos de vivienda o simplemente prefiere construir de acuerdo a sus medios en un lote a preferencia personal diseñando su vivienda en su propio terreno. Hay otro segmento de la población que opta por los proyectos C y D, generalmente asociados con una visión de vida y condiciones económicas más favorables. Aunque los proyectos de gran envergadura, como los tipos C y D, predominan en el crecimiento urbano, la forma de poblamiento A y B mediante la autoconstrucción aún persiste, contribuyendo a la creación de una morfología urbana heterogénea en los nuevos asentamientos.

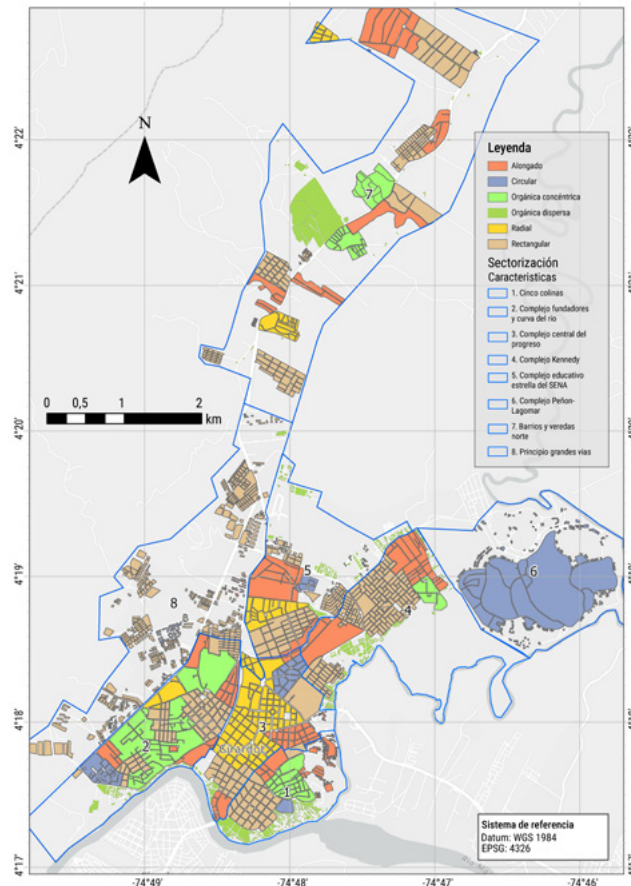
Figura 10 - Perfil urbano en las afueras del norte de la ciudad



Fuente: Fotografía de Gómez et al. abril de 2023.

Nota: se evidencian distintos tipos de morfología y la dirección del nuevo patrón de asentamiento (sur-norte).

Figura 11 - Morfología urbana de Girardot - 2023



Caso de estudio: plaza de mercado

Una plaza de mercado, en cualquier contexto histórico y geográfico, será un lugar merecedor de un análisis urbanístico capaz de dar luces sobre cómo, al ser un espacio público, con vocación económica y en general de encuentro, es el lienzo para las distintas expresiones de la sociedad tanto de su economía y cultura. En este lugar convergen productores, consumidores y mayoristas, siendo en términos generales un lugar para el encuentro de una población diversa, poseedora de grandes y pequeños capitales, por otro lado, eventos como la feria ganadera de Girardot que se realiza desde 1903 (Rodríguez Delgadillo, 2023) le han creado fama de centro comercial regional a la Plaza de Mercado de Girardot (Figura 11).

Este evento logró concentrar el comercio de animales vivos en la región. Gracias a la amplia oferta de ejemplares que se podía encontrar en Girardot, atrayendo inversiones y capital de la región como del Tolima, según el director de la Casa de la Cultura Yepes, A. (comunicación personal, abril 2023), este flujo de dinero en la ciudad provocó también la necesidad de una ampliación de los espacios dedicados al acopio (trilladora

de café), comercio (camellón del comercio, plaza de mercado) y distribución (estaciones del tren) de productos alimenticios.

Para 1946, un año después de un incendio que consumió toda la plaza de mercado, se destinó la ciudad como el lugar de construcción de una de las obras arquitectónicas con mayor relevancia para el país, dando luz verde al arquitecto vienés Leopoldo Rother (1917-2002) para el rediseño y reconstrucción de la plaza de mercado de Girardot. Rother es reconocido como uno de los principales urbanistas de Colombia, a lo largo de su trayectoria profesional participó en numerosos proyectos en ciudades como Bogotá, Medellín y Cali.

La plaza de 1942 (Figura 11) tenía enfrente un parque amplio, con varios árboles y un área de esparcimiento y congregación mayor. Para 1972, el lugar sufre un deterioro significativo en el espacio público, hay menos árboles, no hay pasto y abunda el concreto. La iglesia de San Miguel (Figuras 12 y 13) construida en 1866 “conserva un estilo gótico. Es la primera parroquia que existió en Girardot y fue construida en adobe” (Lozano, 2016) ubicada en el centro histórico es una de las estructuras que refleja un constante mantenimiento lo que la mantiene funcional en la actualidad.



Figura 12 - Vista general de la Plaza de Mercado

Fuente: Álvarez, 2001.

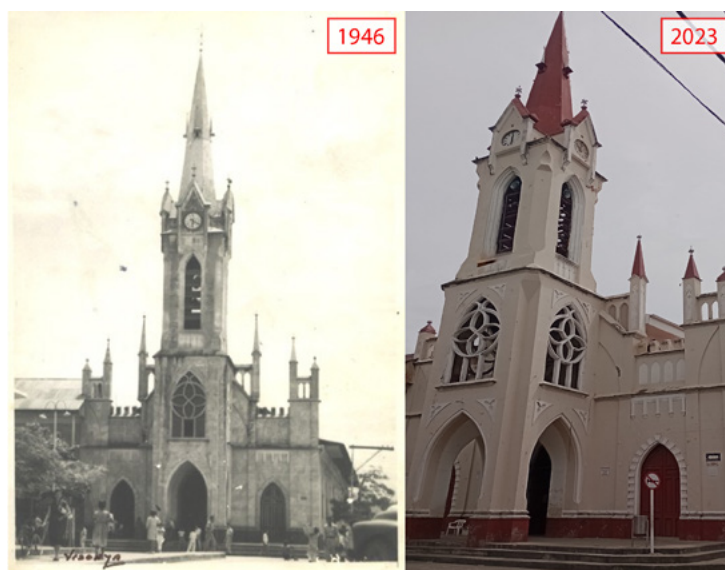


Figura 13 - Fotografía aérea de la zona céntrica de la ciudad

Fuente: Álvarez, 2001.

Nota: se observa claramente la Plaza de Mercado, el Parque Santander y la Iglesia San Miguel (1972).

Figura 14 - Iglesia San Miguel en la Plaza de Mercado de Girardot



Fuente: Álvarez, 2001.

Nota: se observan los detalles de su torre con reloj y su entrada principal y laterales (1946).

Conclusiones

Los trabajos en geografía urbana contemporánea han tenido popularidad debido al crecimiento que están sufriendo las ciudades y núcleos urbanos a nivel global, el campo de la morfología urbana se ha dedicado a teorizar en torno a la forma y estructura de las ciudades, así como los procesos que dan forma a sus paisajes urbanos, estas formas y estructuras responden a distintos momentos históricos, ciclos económicos y usos del suelo.

El mapa de crecimiento urbano permite observar el crecimiento de Girardot y su tendencia de crecimiento está orientada hacia el norte, esto a causa del menor nivel de inclinación sobre estos terrenos, explicado desde la presencia de una cadena montañosa al occidente, el río Magdalena hacia el sur y el río Bogotá al oriente. Este nuevo crecimiento estará predominado por morfologías rectangulares y orgánicas dispersas por nuevos conjuntos residenciales que se emplazarán en zonas semirurales que poco a poco se irán anexando a un perímetro urbano continuo, este nuevo desarrollo futuro puede tener una tendencia fuerte hacia la dependencia de medios de transporte propios para el desplazamiento de su población, debido a las distancias considerables a recorrer y la expansión de redes de transporte público eficientes.

El Parque Santander, junto a la plaza de mercado y la Trilladora Magdalena o puerto histórico de Los Guamos representan un ejemplo de cambios en el uso del espacio y su deterioro, que representan lugares de esplendor en el pasado, con relevancia en la historia de Girardot y, en el caso de la plaza, un hito arquitectónico para el país. Con deterioro se pretende expresar que, existe una ausencia de mantenimiento frente a los espacios mencionados, lo que responde al cambio en su participación en dinámicas de la economía nacional, en las formas en que se usa esta infraestructura y la disminución de la relevancia de Girardot como centro de distribución de mercancías.

Algunas de las antiguas estaciones del ferrocarril, por el contrario, han sido objeto de proyectos de restauración en los últimos

años, por lo que sus instalaciones han renovado y reinventado su uso, por ejemplo, en una importante estación de pasajeros actualmente se encuentra la Casa Cultural de Girardot, siendo un foco de memoria, historia y patrimonio. Por ejemplo, la labor de la casa cultural y su objeto misional de fomentar la cultura en Girardot, utilizando de manera positiva la memoria histórica que aboga por reconocer una grandeza pasada en la ciudad, e invitando a la juventud a construir su futuro desde eso.

Los patrones de poblamiento tienden a estar ligados a geometrías particulares, sin embargo, las necesidades de la gente que habita las ciudades también varían, por lo que la vocación del espacio es dinámica, permitiendo que en cualquier geometría de una ciudad se presente una variedad de formas, colores, alturas, y densidades de acuerdo a los contextos y capacidades de la población. Estudiar los patrones de poblamiento ayuda a entender mejor las dinámicas sociales de la ciudad para enfocar la toma de decisiones de una manera asertiva y efectiva. En el ámbito del urbanismo el concepto de vocación del espacio cobra relevancia al considerar la importancia de entender un lugar no solo por su configuración física, sino también por su significado y función en la vida de las personas. Para Casas Matiz et al (2007) este se puede definir como

el carácter propio con el que se propone un lugar determinado ya sea por sus características geográficas y por los intereses con el que es concebido. Desde el panorama urbano, podemos considerar la vocación como la esencia del lugar, que lo distingue de otro y que le proporciona elementos particulares al diseño espacial (p75).

Referencias

- Álvarez, A. M. (2001). Trabajo de ordenamiento, catalogación y conservación del archivo fotográfico de la Biblioteca del Área Cultural del Banco de la República en Girardot. Girardot: Banco de la República.
- Aragón Reyes, C. (2006). *Girardot Retorna al Río Renovación Urbana y Propuesta Arquitectónica* [Tesis de pregrado, Universidad de los Andes]. Repositorio Institucional – Universidad de los Andes. <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/fe585646-e7ab-435e-b1f8-d8b6191b8249/content>
- Banco de la República. (1978). *Girardot información histórica, social y económica*. Bogotá D. C.: Banco de la República.
- Barros Guerton, J. y Ezquiaga Domínguez, J. M. (2019). *Los datos abiertos como herramienta de aproximación a los parámetros de la morfología urbana. Caso de estudio: densidades urbanas en la Comunidad de Madrid*. Editorial Universitat Politècnica de València. <https://doi.org/10.4995/isu-fh2019.20199667>
- Biblioteca Luis Ángel Arango. (2005-2006). Imagen del ferrocarril en la numismática colombiana [Exposición]. <https://babel.banrepublica.org/digital/collection/p17054coll19/id/708/>
- Bosselmann, P. (2008). *Urban Transformation. Understanding City Design and Form*. Washington: Island Press.
- Brugman, J. (2009). *Welcome to the Urban Revolution: How Cities Are Changing the World*. (Capítulo 10) Bloomsbury Publishing.
- Capel, H. (2002). *La morfología de las ciudades. Tomo I: sociedad, cultura y paisaje urbano*. Ediciones del Serbal.
- Casas Matiz, E. I., García de Moncada, D., Villar Lozano, M. R., Molina Molina, D. y Bolaños Palacios, J. (2007). Función, uso, actividad y vocación: Urbanización "La Merced", un caso de estudio. *Revista de Arquitectura*, 9, 73-80.
- Castro Lozano, V. P. y Vargas Cuervo, G. (2009). Guía de clasificación morfológica de zonas urbanas a partir de sensores remotos. *Ar@cne. Revista Electrónica de Recursos en Internet sobre Geografía y Ciencias Sociales*, 13.
- Ceballos Álvarez, G. I., Ochoa García, R. y Pérez Cruz, J. A. (2006). La geografía económica y los determinantes de la localización industrial: simulación del modelo centro-periferia en un contexto de competencia monopolística. *Contribuciones a la Economía*, 4(1).
- Echeverry Ortiz, M. B. y Suárez Pinilla, T. M. (2020). *Evolución de la morfología urbana en la ciudad y su impacto en el barrio alto de la Cruz en Girardot* [Tesis de pregrado, Universidad Piloto de Colombia] Repositorio Institucional – Universidad Piloto de Colombia. <https://repositorio.unipiloto.edu.co/handle/20500.12277/9459>
- Harvey, D. (1997). Contested Cities: Social Process and Spatial Form. En N. Jewson y S. MacGregor (Eds), *Transforming Cities* (pp. 19-27). Routledge.
- Instituto Geográfico Militar y Catastral. (1943). Carta preliminar de los municipios de Girardot y Nariño, Escala 1:50.000. Bogotá D.C.: Ministerio de Hacienda y Crédito Público.
- Lozano, L. M. (2016). *El paisaje productivo de Girardot, estrategia para la apropiación del patrimonio industrial* [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Javeriana]. Repositorio Institucional-Pontificia Universidad Javeriana. <http://hdl.handle.net/10554/20225>
- Martínez, M. A. y García, M. B. (2000). *Girardot, uno de los siete caminos*. Escuela Superior de Educación Pública (ESAP).
- Montoya Garay, J. (2005). *Cambio urbano y evolución discursiva en el análisis de la ciudad latinoamericana: de la dependencia a la globalización*. Universidad Nacional de Colombia.

Estrategia de localización con *geomarketing* y el modelo de Huff: un enfoque para la expansión en el sector de comida rápida

Localization Strategy with Geomarketing and the Huff Model: An Approach to Expansion in the Fast Food Sector

Katherine Santiago Monsalve¹ 
Gloria Yulier Cadena-Montero² 

Resumen

Este trabajo nace del interés por apoyar desde la geografía a los empresarios de la ciudad de Mérida-Venezuela en la toma de decisiones sobre la localización y marketing de sus negocios. Desde 2017, el Instituto de Geografía y Conservación de Recursos Naturales de la Universidad de Los Andes estaba recibiendo solicitudes de asesorías por parte del sector productivo de la región, algunas relacionadas con procesos de localización, otras sobre bases de datos espaciales para identificar y ubicar sus clientes potenciales. Así se planteó, como caso de estudio, diseñar una estrategia de localización de una empresa dedicada a la venta de comida rápida en el sector Milla Central de la ciudad Mérida. Se trabajó desde una perspectiva exploratoria-correlacional con un diseño de campo, se empleó el *geomarketing* para la formulación de dicha estrategia, específicamente con el modelo de localización de Huff. Se complementó con el análisis estadístico de información de las preferencias de los consumidores y calidad de servicios de la competencia. Durante la investigación se encontraron dificultades con el acceso a la información demográfica y económica. Se demostró que la metodología utilizada es útil para estimar lugares óptimos y que el modelo Huff es adecuado para escenarios con limitaciones de información.

Palabras clave:

localización, *geomarketing*, geografía económica, modelo de Huff, sistemas de información geográfica.

Cómo citar

Santiago Monsalve, K. y Cadena-Montero, G. Y. (2024). Estrategia de localización con *geomarketing* y el modelo de Huff: un enfoque para la expansión en el sector de comida rápida. *Análisis Geográficos*, 57(1), 170 - 187.

Abstract

In recent decades, deforestation has become one of the most relevant environmental problems, due to the loss of strategic areas for biodiversity conservation and climate change effects mitigation (WWF, 2024). Because of this and the necessity to have relevant data that contributes to the oppose against this phenomenon, a methodology for assessing territories at risk of deforestation at a municipal scale was proposed. This methodology included an inter-institutional consultation of variables, secondary information searching, and data statistical treatment to create deforestation threat and vulnerability sub-indices. The risk assessment was made by combining the threat and vulnerability sub-indices that indicate, on one hand, the concentration and trends of deforestation, and on the other, five categories that describe vulnerability conditions. The main findings indicated that high and very high-risk areas were concentrated in the Orinoquía-Amazon transition region. This methodology allowed the integration of threat and vulnerability components to generate a composite deforestation risk index that granted a simultaneous vision of municipalities where deforestation phenomena are more intense, in response to territorial weaknesses/fragilities like social, economic, institutional, or security conditions.

Keyword:

location, geomarketing, economic geography, Huff model, geographic information systems

Introducción

El *geomarketing* ha emergido como una herramienta fundamental en la intersección entre la geografía y el marketing, revolucionando la manera en que las empresas y organizaciones comprenden y abordan sus mercados. Este enfoque integra el análisis espacial con estrategias comerciales para optimizar la toma de decisiones, utilizando datos geoespaciales para identificar patrones de comportamiento, preferencias de consumidores y oportunidades de mercado. En el contexto de la geografía, el *geomarketing* no solo ofrece una perspectiva detallada sobre la distribución y las características de los clientes, sino que también permite una mejor planificación y ejecución de estrategias basadas en la localización. La capacidad de combinar información geográfica con datos de mercado permite a las empresas diseñar campañas más precisas, seleccionar ubicaciones estratégicas para nuevos puntos de venta y ajustar sus ofertas para satisfacer las demandas regionales específicas. Así, el *geomarketing* se convierte en una herramienta indispensable para maximizar el impacto y la eficiencia de las actividades comerciales en un entorno cada vez más competitivo y dinámico.

Desde 2017, productores de café, cacao, cervezas artesanales, chocolatería, entre otros han buscado el apoyo de expertos en SIG y en elaboración de base de datos interactivas con el propósito de tener acceso a información que les permitan tomar decisiones. Una de las instituciones que ofrece asesorías en Mérida es el Instituto de Geografía y Conservación de Recursos Naturales de la Universidad de Los Andes, el cual ha venido desarrollando algunos proyectos vinculados con estos temas. Esta experiencia permitió identificar una necesidad creciente en el sector productivo de la región, lo que llevó a fortalecer este tema a través de una línea de investigación.

Adicionalmente a la demanda del sector productivo, las fuertes limitaciones de acceso a la información tanto de instituciones oficiales como de organizaciones productoras, como, por ejemplo, el Instituto Nacional de Estadísticas (INE) y la Cámara de Comercio de Mérida, motivó a plantearse un estudio de localización de un pequeño establecimiento en un área reducida, a fin de poder

obtener la información y verificar cuál de las metodologías se podía aplicar en estos escenarios.

De esta manera, el trabajo se centró en el diseño de una estrategia de localización a través del *geomarketing* para una empresa dedicada a la venta de comida rápida —Tiago's— en el sector de Milla Central, Mérida - Venezuela.

A continuación, se presentan el diseño y enfoque metodológico, una descripción y explicación del modelo de localización de Huff y su aplicación para el caso de estudio, el análisis estadístico de las preferencias y la calidad de los servicios de la competencia, los resultados y discusión, y finalmente las conclusiones de la investigación.

Diseño y enfoque metodológico

En el competitivo sector de la comida rápida, la elección estratégica de ubicación es crucial para el éxito de una empresa. Para Tiago's, un negocio dedicado a ofrecer experiencias culinarias rápidas y de calidad en Mérida - Venezuela, el uso de *geomarketing* combinado con el modelo de localización de Huff representa una estrategia avanzada y precisa para determinar la ubicación óptima de sus puntos de venta.

El *geomarketing*, a partir de la integración del análisis espacial con la estrategia comercial, permite a Tiago's analizar de manera detallada las características geográficas y demográficas del área de Milla Central. Al examinar datos sobre la densidad de población, patrones de movilidad y comportamiento del consumidor en esta área específica, la empresa puede identificar las zonas con mayor potencial para atraer clientes y maximizar la rentabilidad.

La selección del modelo a utilizar implicó revisar distintos modelos de localización, algunos de estos fueron: enfoque microeconómico (EM; Pereira, 2004; Garrocho Rangel, 2011), Teoría del Lugar Central (TLC; Becerra Valbuena, 2013; Palacios Orejuela, 2018), Teoría de la Interacción Espacial (TIE; Garrocho Rangel, 2003, 2011; Baviera, 2012; Castro Pérez y Quintero Venegas, 2022), Teoría de la Subasta del Suelo Urbano (TSSU; Garrocho Rangel, 2003, 2011; Baer y del Río, 2021) así como los principales modelos

¹ Universidad de Los Andes, Mérida – Venezuela. katherinesantiago@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3211-3742>.
² Universidad de Los Andes, Mérida – Venezuela. yuliercadena@ulave. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5958-0746>.

de localización de actividades usados en el *geomarketing*: medidas de oportunidad acumulada, modelos gravitacionales o modelos de interacción espacial y medidas basadas en la teoría aleatoria de utilidad (Montejano y Cruz, 2018). Se prefirió el modelo de localización de Huff por su simplicidad y la facilidad de aplicar en los escenarios de limitaciones de información.

Aplicando este modelo, Tiago's puede evaluar cómo la proximidad de sus establecimientos a áreas residenciales, centros comerciales y competidores influye en el comportamiento de los clientes. El modelo también permite simular diferentes escenarios de ubicación para prever cómo variaciones en la oferta y la demanda pueden afectar el éxito de cada ubicación potencial. Así, se trabajó con el modelo de Huff a través de un análisis de datos espaciales mediante el uso de QGIS.

Por otra parte, durante el proceso de investigación se tuvo que delimitar el alcance temático, temporal y espacial. La investigación se consideró de carácter exploratorio debido a que el nivel de conocimiento del tema en Venezuela y Mérida era bajo, a pesar que para la década de los sesenta, en Estados Unidos y el Reino Unido, comenzaron a aplicar las técnicas estadísticas y geográficas para estudios de mercado y planificación comercial. Para las siguientes décadas, las empresas y los académicos comenzaron a integrar los datos espaciales con las estrategias de marketing, las investigaciones y la aplicación del *geomarketing* se expandió gracias a los avances de las tecnologías, especialmente en los países desarrollados. Es a partir de 2010 que países como México, Argentina y Chile comienzan a realizar investigaciones y aplicaciones centradas en la optimización de la ubicación de negocios y el marketing.

Así mismo, la investigación se define como correlacional, porque se realiza un análisis estadístico bivariado, a diferencia del nivel descriptivo donde el análisis estadístico es univariado, y no se pretende demostrar relaciones de causalidad. Ramos (2020) argumenta que el alcance de una investigación correlacional se da de la necesidad de plantear una hipótesis en la cual se proponga una relación entre 2 o más variables, surge de la aplicación de procesos estadísticos inferenciales que buscan extrapolar los resultados de la investigación para beneficiar a toda la población.

Área de estudio

Desde el punto de vista espacial, se limita a un sector de la parroquia Milla (Milla Central) del municipio Libertador, parte de la ciudad de Mérida (Figura 1), conformado por dieciocho manzanas, con una superficie de 268.400 m² aproximadamente.

Este lugar se caracteriza por tener una buena movilidad y afluencia de población local y foránea (turistas, estudiantes universitarios). Es una de las zonas más accesible de la ciudad junto con el centro donde se ubican los poderes —gobierno regional, eclesiástico, legislativo, económico-financiero y educativo—, alrededor de la Plaza Bolívar.

La población que reside y frecuenta Milla Central es de todos los grupos etarios. Alrededor de la Plaza de Milla se tiene la iglesia y otros centros religiosos, escuelas, el consejo comunal, restaurantes, cafés, hoteles, clínicas y comercio en general. Es un lugar dinámico de día y de noche, con presencia de niños en la plaza durante el día en las horas escolares y en los momentos de recreación, de jóvenes y adultos en las noches por los cafés y

restaurantes, y de adultos mayores en las horas de la misa – cultos religiosos y los domingos familiares.

Para 2014, Milla se definía como un sector con una pirámide de edades con dos picos, uno de una población joven estudiantil y el otro de una población adulta mediana y adulta mayor, por ser uno de los sectores relativamente más antiguo de la ciudad y con una preferencia de esta población por su centralidad y el acceso a todos los servicios (Escuela de Geografía, 2014).

Hoy esta estructura demográfica se ha modificado un poco producto de la migración interna e internacional, donde el grupo que más ha emigrado es el de los jóvenes. Sin embargo, el sector sigue conservando su dinámica, la cual se ha visto favorecida por la facilidad de acceso en transporte público y peatonal.

Modelo de Huff y su aplicación

Como se mencionó anteriormente, para esta investigación se seleccionó el modelo de localización de Huff, considerado una herramienta de análisis espacial en economía regional, que se utiliza para estimar la probabilidad de que los consumidores elijan un punto de venta específico entre varias alternativas en función de su distancia y la competencia existente. Desarrollado por David Huff en 1963, el modelo es particularmente útil para la formulación de estrategias de localización y planificación de redes comerciales (Huff, 1964).

El modelo de Huff se basa en dos conceptos principales: (i) atracción de un punto de venta (o atractivo) y (ii) la distancia. El primer concepto es la probabilidad de que un consumidor elija un punto de venta, esto depende de la atracción o atractivo de ese punto, que suele medirse en términos de su tamaño, variedad de productos, servicios ofrecidos, etc. El segundo se explica en que la probabilidad de elección disminuye a medida que aumenta la distancia entre el consumidor y el punto de venta. El modelo asume que los consumidores prefieren los puntos de venta que están más cerca y que las opciones más lejanas se vuelven menos atractivas (Huff, 1964; Freitas, 2019).

Es un modelo de tipo gravitacional, debido a que utiliza las nociones de distancia y masa. Es considerado probabilístico porque calcula la probabilidad P_{ij} que un consumidor situado en un punto i realice sus compras en una tienda j considerando la siguiente fórmula:

$$P_{ij} = \frac{S_j}{T_{ij}^\beta} \left(\sum_{j=1}^n \frac{S_j}{T_{ij}^\beta} \right)^{-1}$$

Donde:

T_{ij} es el tiempo de viaje o distancia desde el origen de un punto de demanda hasta el destino de la oferta en particular,

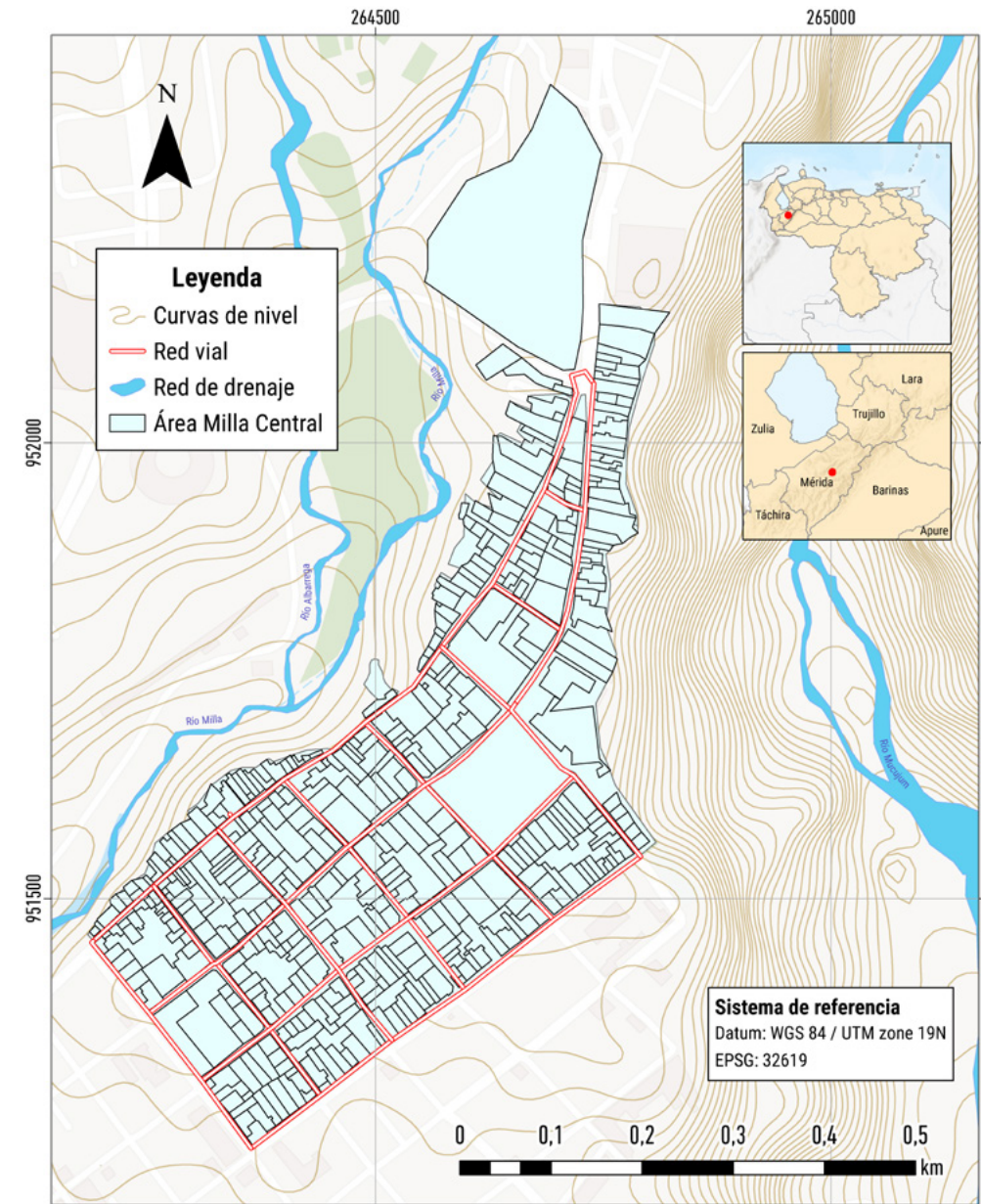
S_j es el tamaño de la tienda, medidos en metros cuadrados de área de venta,

β es un valor empírico estimado que refleja el efecto de la distancia en el tiempo para distintos tipos de compras (fricción de la distancia, este varía de 1 a 3).

Alcaide (2012, citado en Montejano y Cruz 2018), explica que este modelo

se basa teóricamente en el axioma de Luce (1959), el cual plantea que las personas seleccionan de manera probabilística los lugares a los que suelen acudir a abastecerse, con base en la utilidad que les proporciona un lugar con relación a todos los demás (p.106).

Figura 1 - Mapa del sector de Milla Central, Mérida-Venezuela, 2024



Es un principio fundamental en la teoría de elección y análisis de decisión, especialmente en el contexto de modelos de elección discreta. Este axioma es parte de la teoría de preferencias y ayuda a entender cómo las personas eligen entre varias alternativas (Freitas, 2019).

En este sentido, las variables que se seleccionaron para aplicar el modelo de localización de Huff fueron: (i) la distancia y (ii) el tamaño del local. Complementariamente, se consideraron otras

variables que fueron levantadas en la encuesta 2 para poder conocer la satisfacción e insatisfacción de los clientes acerca de los servicios que ofrecen los locales de la competencia, la cual será desarrollarlo en el siguiente apartado. En la Tabla 1 se puede visualizar las variables, indicadores, unidades de medida y las fuentes-instrumentos de información empleados para aplicar el modelo.

Tabla 1 - Variables utilizadas en el modelo de localización de Huff

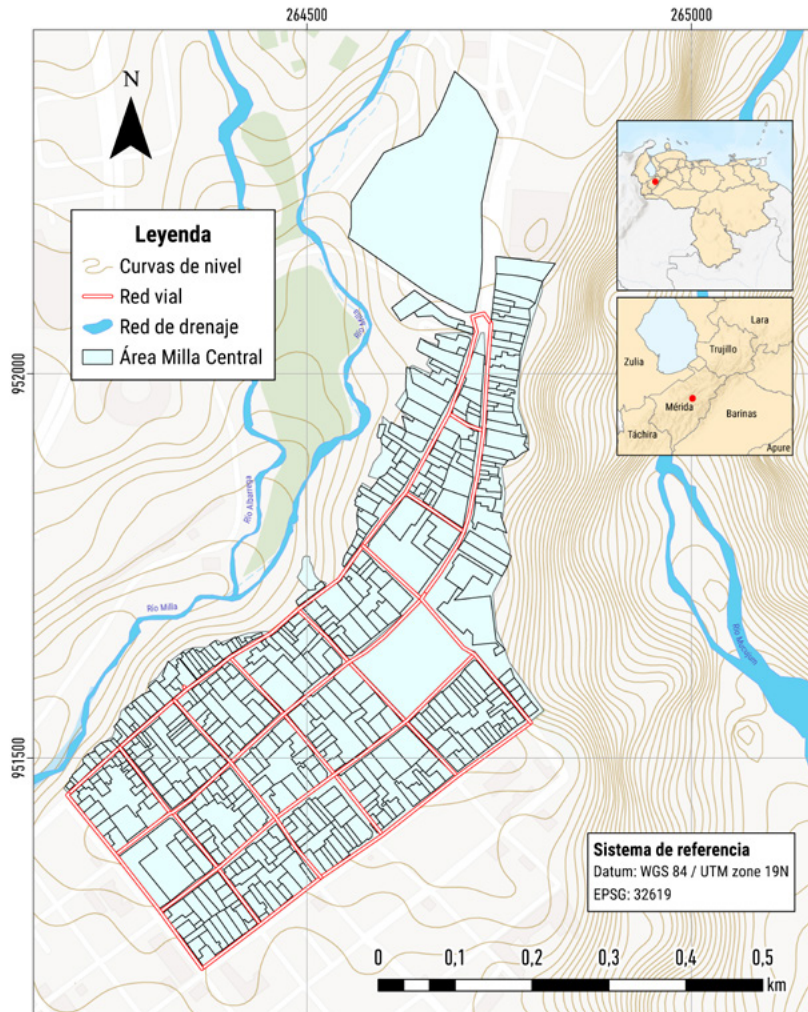
Variable	Indicador	Unidad de medida	Fuente información
Distancia	Velocidad por tiempo	Metros	Google Maps.
Tamaño	Local en metros cuadrados	Metros cuadrados	Cartografía, medidos en QGIS.

Estudio inicial: recolección de datos

En esta fase de la investigación se inicia el proceso de obtención de los datos necesarios para aplicar el modelo de Huff, es decir, la distancia y los tamaños de los establecimientos de la competencia.

Para conseguir la distancia, se procedió a identificar las manzanas con letras, desde la A hasta la W (Figura 2) y la ubicación de los establecimientos de la competencia (Figura 3). Con esta información se midieron y promediaron los recorridos —medidos en metros— desde cada una de las manzanas hasta cada local de comida rápida. Este procedimiento se realizó mediante el SIG y con Google Maps con la opción de distancia recorrida en metros en la modalidad caminando. Se hizo de esta manera debido a que

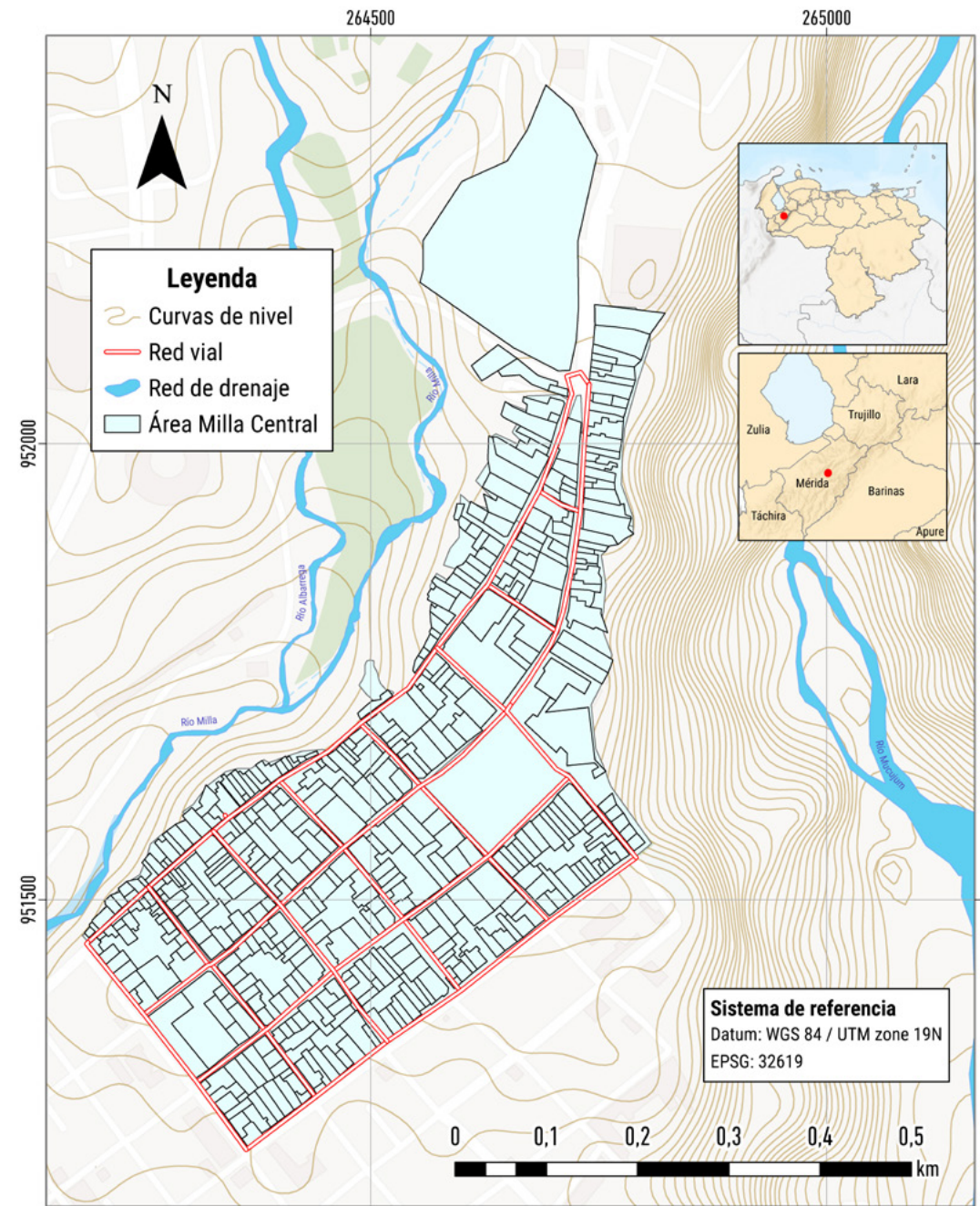
Figura 2 - Mapa de las manzanas pertenecientes a Milla Central



la condición de movilidad de la población local es reducida³ y se realiza, preferiblemente caminando por la falta de combustible y deterioro de los servicios de transporte público.

Para el cálculo del área de los establecimientos de la competencia se realizó en QGIS. Se digitalizó la información de cada uno de los inmuebles para Milla Central, y luego de los establecimientos que fueron verificados en trabajo de campo. Se verificó el sistema de referenciación de coordenadas de la capa y las unidades métricas para garantizar que los cálculos fueran precisos. Vale aclarar que Mérida es una ciudad de montaña, mediana, con 330.000 habitantes aproximadamente (INE, 2024). Desde 2014, cuando inició la escasez de combustible en Venezuela, se observó un retroceso de la población a la ciudad compacta, debido a que la movilidad de la población en la ciudad se redujo y esto conlleva a que los habitantes procurarán satisfacer sus necesidades con recorridos más cortos y caminando. La ciudad comenzó a sufrir transformaciones en la distribución espacial de las actividades económicas, un ejemplo emblemático es la reactivación del mercado en el centro, donde se ubica actualmente el Centro Cultural Tulio Febres Cordero, el cual había sido trasladado a la avenida Las Américas después del incendio del 31 de mayo de 1987 (Cerrada, 2024). Durante la escasez del combustible, por la avenida 2 Lora, se activó el mercado de manera informal, en la calle, logrando una importante afluencia de la población para realizar sus compras de alimentos frescos.

Figura 3 - Localización de establecimientos de comida rápida, Milla central



precisos. Se accedió a la tabla de atributos de la capa y se utilizó la calculadora de campos, se seleccionó el algoritmo del cálculo de área expresado en la opción de “área”.

Los resultados de los cálculos de las variables antes mencionadas se encuentran expresados en la Tabla 2, en esa sección se puede

observar el área en metros cuadrados de los establecimientos y los cálculos de las distancias recorridas en metros desde cada local hasta las manzanas correspondientes a Milla Central.

Tabla 2 - Distancia recorrida en metros

Orden	Nombre del establecimiento	Área (m²)	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
1	The Dog House	20	350	350	450	350	260	260	170	168	262	386	233	126	118	162	243	388	348	306	450	625	575	617	725
2	Moto lunch comida rápida	5	550	538	613	513	438	450	350	350	438	530	535	238	240	122	200	298	203	202	310	475	425	450	550
3	Casa Yuraima	40	400	280	205	104	195	295	298	198	104	121	205	300	400	525	323	378	438	530	525	613	625	686	700
4	Pizzería El Sabor del mundo de los quesos	30	550	450	450	348	348	450	350	250	253	350	150	160	255	215	111	248	180	204	298	450	413	417	550
5	El Rey de las Cocadas	20	700	638	638	538	538	638	538	438	438	510	333	333	413	328	210	190	100	169	117	270	228	247	375
6	El Ángel café	25	500	400	400	303	300	413	315	210	210	314	106	107	215	218	114	255	228	248	333	500	463	467	625
7	Goloso	20	260	205	223	128	101	165	180	114	126	232	225	215	303	400	340	500	450	460	563	725	688	683	825
8	Restaurant solo pastas	30	255	256	350	258	168	165	100	133	208	318	243	139	141	265	345	500	450	404	550	725	700	683	850
9	Da' Nova Pizzería	30	203	205	304	210	109	111	97	101	203	312	295	193	200	315	400	550	500	460	613	788	738	733	875
10	Mostazas	5	875	788	738	650	688	763	675	588	575	570	450	488	563	475	325	230	225	246	98	136	90	113	230
11	Pizzería La Astilla	70	500	425	425	345	328	400	300	255	233	324	132	111	190	198	190	290	253	262	363	525	488	517	625
12	Arepera Salas	40	750	650	664	563	550	650	563	463	463	560	363	363	463	350	245	243	138	177	112	248	183	180	320
13	Restaurant café 4/8 House Grill	50	95	190	298	388	280	188	293	400	500	478	600	500	400	513	700	850	800	730	913	1075	1038	1050	1200
14	Pizzería Milla's	30	500	500	600	500	400	400	300	300	400	500	295	195	198	119	200	318	228	181	345	513	463	467	625
15	Pizzería El Sabor de los 4 quesos	70	700	600	500	400	500	600	513	425	315	316	210	313	413	320	115	117	113	232	208	283	308	373	400
16	Café Makiatto	20	550	450	450	350	350	450	350	255	250	360	148	154	253	213	116	248	173	300	265	438	413	417	525
17	Burger Bar	50	97	195	300	363	265	185	265	363	500	470	575	475	388	500	713	838	813	720	913	1075	1038	1050	1150
18	Heladería copitos de crema	20	450	450	550	450	350	350	260	260	388	470	258	165	165	275	200	330	255	216	375	535	513	517	625

Tabla 3 - Datos utilizados para el cálculo de probabilidad

Orden	Nombre del establecimiento	Área (m²) S _j	Manzana A T _{ij}	β ⁱ
1	The Dog House	20	350	2
2	Moto Lunch Comida Rápida	5	550	2
3	Casa Yuraima	40	400	2
4	Pizzería El Sabor del Mundo de los Quesos	30	550	2
5	El Rey de las Cocadas	20	700	2
6	El Ángel Café	25	500	2
7	Goloso	20	260	2
8	Restaurant Solo Pastas	30	255	2
9	Da' Nova Pizzería	30	203	2
10	Mostazas	5	875	2
11	Pizzería La Astilla	70	500	2
12	Arepera Salas	40	750	2
13	Restaurant Café 4/8 House Grill	50	95	2
14	Pizzería Milla's	30	500	2
15	Pizzería El Sabor de los 4 Quesos	70	700	2
16	Café Makiatto	20	550	2
17	Burger Bar	50	97	2
18	Heladería Copitos de Crema	20	450	2

Se procede a aplicar la fórmula para obtener la probabilidad de que los consumidores de la manzana A se desplacen hasta The Dog House teniendo la posibilidad de ir a los locales antes mencionados.

$$PA_{A1} = (20/350^2) / ((20/350^2 + 5/550^2 + 40/400^2 + 30/550^2 + 20/700^2 + 25/500^2 + 20/260^2 + 30/255^2 + 30/203^2 + 5/875^2 + 70/500^2 + 40/750^2 + 50/95^2 + 30/500^2 + 70/700^2 + 20/550^2 + 50/97^2 + 20/450^2))$$

$$PA_{A1} = 0,011835445$$

$$PA_{A1} = 0,011835445^{*}100$$

$$PA_{A1} = 1\%$$

Una probabilidad del 1% de que los consumidores de la manzana A se desplacen hasta The Dog House, teniendo la posibilidad de ir a otros locales, indica que es muy poco probable que estos consumidores elijan The Dog House como su destino. Este 1% sugiere que de cada 100 consumidores de esa área solo uno optaría por desplazarse hasta The Dog House, mientras que el resto preferiría otros locales disponibles.

4 La selección del valor de β en un cálculo de probabilidad dependió del contexto específico del problema que se está tratando de resolver. La fricción de la distancia en el área de estudio está mediada por las características de la movilidad y del entorno, en este caso la distribución de las manzanas y de los competidores se encuentran alrededor de la plaza de Milla, la vialidad es estrecha (típica de una ciudad de montaña y colonial) y presenta una pendiente modelada a fuerte.

Aplicación del modelo de Huff

Teniendo la distancia y el tamaño de los establecimientos, datos que se necesitan para poder aplicar el modelo de Huff, se procedió a realizar el cálculo de la probabilidad de que los consumidores de las diferentes manzanas acudieran a uno de los locales de comida rápida teniendo dieciocho opciones. Los locales seleccionados fueron los activos y establecidos en el sector, que ofrecen servicios de comida rápida, ya sea de competencia directa (locales de venta de hamburguesas) o indirecta (locales que ofrecen otras variedades de comida rápida) para Tiago's.

A modo de síntesis, se explicará de manera detallada uno de los casos, por ejemplo la probabilidad de que los consumidores de la manzana A se trasladen a comer en The Dog House (véase Figura 3) considerando que también tienen la posibilidad de comer en Moto Lunch Comida Rápida, Casa de Yuraima, Pizzería El Sabor del Mundo de los Quesos, El Rey de las Cocadas, El Ángel Café, Goloso, Restaurant Solo Pastas, Da' Nova Pizzería, Mostazas, Pizzería La Astilla, Arepera Salas, Restaurant Café 4/18 House Grill, Pizzería Milla's, Pizzería El Sabor de los 4 Quesos, Café Makiatto, Burger Bar y Heladería Copitos de Crema. Recordemos la fórmula:

$$P_{ij} = \frac{S_j}{T_{ij}^\beta} / \sum_{j=1}^n \left(\frac{S_j}{T_{ij}^\beta} \right)$$

T_{ij} es el tiempo de viaje o distancia desde el origen de un punto de demanda hasta el destino de la oferta en particular.

S_j es el tamaño de la tienda, medidos en metros cuadrados de área de venta.

β es un valor empírico estimado que refleja el efecto de la distancia en el tiempo para distintos tipos de compras (fricción de la distancia, este varía de 1 a 3).

En la Tabla 3 se encuentra el área en m² de cada uno de los locales de comida rápida seleccionados y la distancia recorrida desde la manzana A hasta cada local. Es importante acotar que en la Tabla 3 se ven reflejados los cálculos solo para la manzana A, y que de la misma manera se obtuvieron los resultados para las demás manzanas del sector de Milla Central.

Esta baja probabilidad podría interpretarse de varias maneras: (i) preferencia baja: los consumidores de la manzana A no consideran The Dog House como una opción atractiva en comparación con otras alternativas disponibles; (ii) es posible que The Dog House esté más lejos o sea menos accesible en comparación con otros locales más cercanos.

En resumen, un 1% indica una probabilidad muy baja, lo que podría ser motivo de preocupación para The Dog House si desea

atraer más consumidores de la manzana A. Y una ventaja para Tiago's porque no representa una competencia si desea atraer la población de la manzana A.

De esta manera, se realizaron los cálculos de probabilidad de que los consumidores de cada manzana se desplazaran para comer a cada uno de lugares de comida rápida, teniendo dieciocho posibilidades a los cuales acudir. Los resultados se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4 - Probabilidades de las manzanas A - W

Orden	Competencia	Probabilidad (%)																									
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W			
1	The Dog House	1	3	2	2	3	3	6	6	3	2	3	7	14	8	2	1	1	1	3	1	2	1	1	1	2	
2	Moto Lunch Comida Rápida	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3	Casa Yuraima	2	8	21	41	10	10	5	4	8	33	41	7	3	1	2	2	3	1	2	2	1	3	2	2	4	
4	Pizzería El Sabor del Mundo de los Quesos	1	2	3	3	2	2	2	4	4	3	9	7	4	7	13	5	6	9	4	5	4	5	4	5	5	
5	El Rey de las Cocadas	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	6	14	9	16	8	9	9	7		
6	El Ángel Café	1	2	3	3	3	2	2	5	5	4	16	12	5	6	10	4	3	5	2	3	3	3	3	3		
7	Goloso	2	7	9	13	19	8	5	12	11	6	3	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2		
8	Restaurant solo Pastas	3	7	5	5	10	12	25	14	6	4	4	9	15	5	1	1	1	1	2	1	2	1	2	2		
9	Da' Nova Pizzería	5	11	7	7	24	26	27	24	7	5	2	5	7	3	1	1	1	2	1	1	1	1	2	2		
10	Mostazas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
11	Pizzería La Astilla	1	6	8	6	6	6	5	7	9	12	10	28	32	19	19	8	7	12	6	8	7	7	8	8		
12	Arepera Salas	1	1	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	3	4	7	14	16	35	20	28	31	21		
13	Restaurant Café 4/8 House Grill	41	22	13	4	6	15	5	3	2	3	1	1	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2		
14	Pizzería Milla's	1	2	2	1	2	2	3	3	2	2	2	4	7	22	4	3	4	11	3	3	3	3	4	4		
15	Pizzería El Sabor de los 4 Quesos	1	3	6	5	3	2	2	3	6	10	11	4	4	7	28	52	37	16	18	27	17	14	23			
16	Café Makiatto	0	2	2	2	2	1	1	2	3	2	6	5	3	5	8	3	5	3	3	3	3	3	4			
17	Burger Bar	39	21	12	4	7	15	6	3	2	3	1	1	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2		
18	Heladería Copitos de Crema	1	2	1	1	2	2	3	2	1	1	2	4	7	3	3	2	2	5	2	2	2	2	2	3		

Análisis estadísticos de las preferencias de los consumidores y la calidad de los servicios de la competencia

El análisis estadístico de las preferencias de los consumidores y la evaluación de la calidad de los servicios ofrecidos por la competencia son componentes esenciales para complementar el modelo Huff en la definición de una estrategia de localización para los puntos de venta de Tiago's. Este enfoque permite a la empresa no solo identificar las áreas con mayor potencial de atracción de clientes con base en la distancia y el tamaño de los establecimientos, sino también entender las dinámicas del mercado y los factores que influyen en las decisiones de compra de los consumidores. Al integrar datos sobre las preferencias y percepciones de los clientes con el modelo Huff, Tiago's puede optimizar la ubicación de sus puntos de venta, asegurando que se sitúen en lugares estratégicos que maximicen su cuota de mercado y mejoren su competitividad frente a otras ofertas en la zona.

Entre las variables seleccionadas se incluyeron la oferta de productos, la percepción de calidad, los precios, y el tiempo de pedido y de espera. Estas variables influyen directamente en las decisiones de los consumidores. En la Tabla 5 se muestra la operacionalización de las variables cualitativas, y en la Tabla 6, las variables cuantitativas como información complementaria para comprender las decisiones de los clientes a la hora de consumir productos de comida rápida.

Tabla 5 - Variables cualitativas de la encuesta

Variable	Indicador	Unidad de medida	Fuente información
Calidad del servicio	Presentación del producto	Satisfecho e insatisfecho	Encuesta
	Imagen corporativa	Satisfecho e insatisfecho	Encuesta
	Higiene	Satisfecho e insatisfecho	Encuesta
	Entorno	Satisfecho e insatisfecho	Encuesta
	Ubicación	Satisfecho e insatisfecho	Encuesta
	Seguridad	Satisfecho e insatisfecho	Encuesta
	Servicio a domicilio	Satisfecho e insatisfecho	Encuesta
	Calidad de la comida	Satisfecho e insatisfecho	Encuesta
	Cocción	Satisfecho e insatisfecho	Encuesta
	Aromas	Satisfecho e insatisfecho	Encuesta
Variedad del producto	Sabores	Satisfecho e insatisfecho	Encuesta
	Prueba de hamburguesas no tradicionales	Si/no	Encuesta

Tabla 6 - Variables cuantitativas de la encuesta

Variable	Indicador	Unidad de medida	Fuente información
Tiempo	Tiempo de pedido	Minutos	Encuesta
	Tiempo de espera	Minutos	Encuesta
Precio	Precio de los productos	USD	Encuesta

En el proceso de recolección de datos de los consumidores, se utilizó la encuesta para obtener información detallada sobre preferencias, hábitos de consumo, y perfil demográfico de la población objetivo. Para esta investigación se aplicaron dos

encuestas: la encuesta 1, para obtener la información del perfil demográfico, y la encuesta 2, para obtener preferencias y percepción de la calidad del servicio.

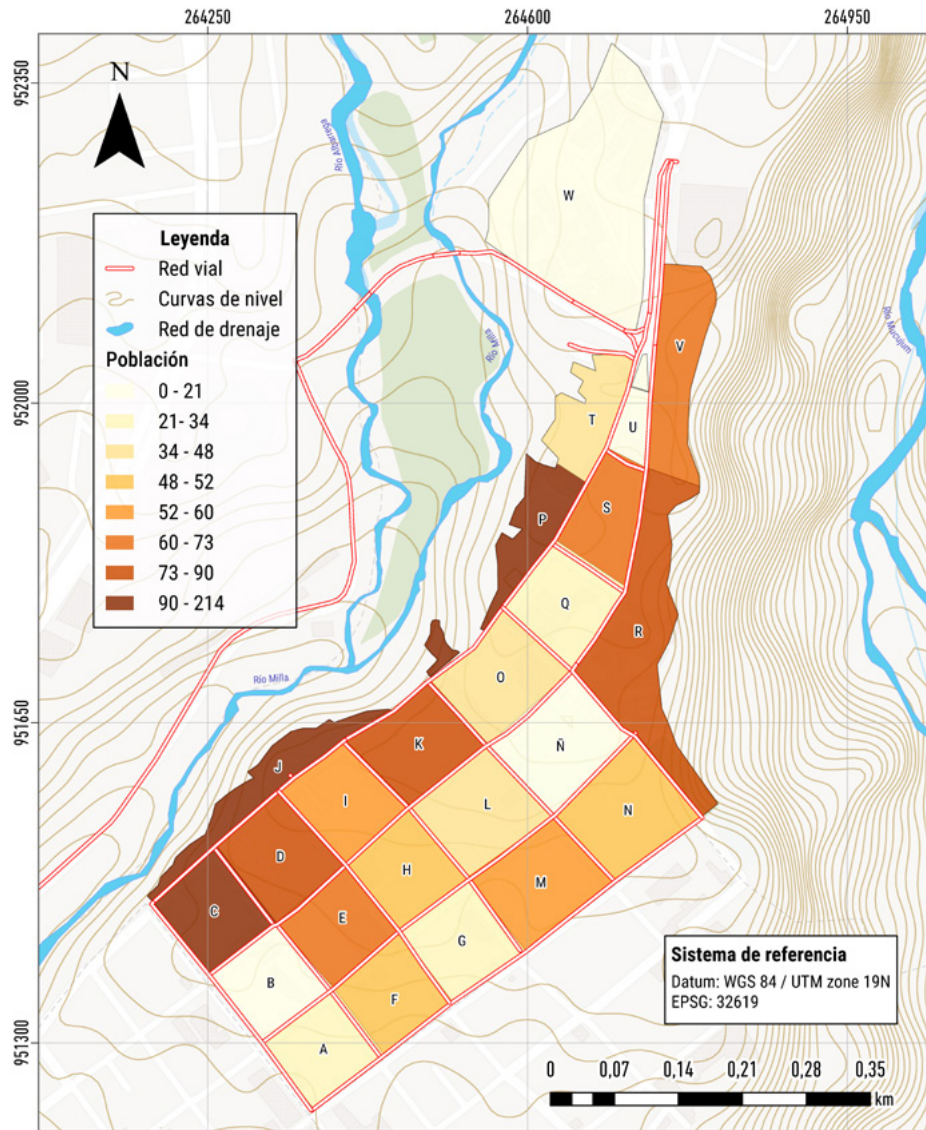
La encuesta 1 se aplicó por manzanas en el sector de Milla Central y de esta manera se obtuvo el total de la población (véase Figura 2). Así mismo, en función de ese total se empleó la segunda encuesta aplicando un muestreo aleatorio en el área de estudio (Figura 4).

La encuesta 1 se aplica para obtener los datos de la población total del área de estudio, debido a que no se logró obtener los datos de la población objetivo, en primera instancia porque el INE no presenta datos a esa escala en sus publicaciones digitales, específicamente en la página web oficial, y tampoco le da acceso a la población

—investigadores, planificadores y académicos— en los casos de realizar solicitudes por escrito. Otras organizaciones del Estado que manejan censos de población a menor escala son los Consejos Comunales y los Comités Locales de Abastecimiento y Producción (CLAP), por sus funciones clave en la organización y distribución de recursos dentro de las comunidades, sin embargo, no se concretaron las reuniones programadas para recibir la información.

Así entonces se elaboró la encuesta y se levantó la información demográfica por grupos de edades y sexo por manzanas y poder tener la distribución de los consumidores potenciales a la misma escala del modelo de Huff. En la Figura 4 se muestra la población objetivo en rangos por manzanas.

Figura 4 - Mapa de distribución de la población de 15 a 49 años por manzanas en Milla Central



Para seleccionar la población objetivo se tomó en consideración datos de estudios previos sobre la temática, una de las referencias fue el trabajo de Anié Val (2017), quien menciona que “este tipo de restauración se dirige a la mayoría de la población, sobre todo a edades comprendidas entre los 15 y los 65 años” (p7).

Se partió de la idea que el consumo de comida rápida varía según la edad, el grupo de 15-19 años suele consumir más comida rápida debido a su estilo de vida activo y social. El grupo de los adultos jóvenes (20-34 años), especialmente aquellos en la universidad o en los primeros años de su carrera, también consumen grandes cantidades de comida rápida, por su estilo de vida ocupada. Los adultos de mediana edad (35-49 años), consume menos comida rápida que los más jóvenes, pero sigue consumiendo debido a sus responsabilidades laborales y familiares que a veces los lleva a consumir este tipo de alimentos. Finalmente, el grupo de adultos mayores (65 y más años) es el grupo que menos consume este tipo de alimentos, debido a que a medida que pasan los años el cuerpo va cambiando, el metabolismo no es el mismo y se decantan por consumir alimentos que ayuden a cuidar el estado de salud (Diario Libre, 2021; Maldonado, 2021). Bajo estos criterios se tomaron los grandes grupos etarios de jóvenes, adultos jóvenes y adultos de mediana edad para esta investigación.

Muestreo aleatorio simple

Existen maneras de calcular el tamaño de la muestra aun cuando la población total es desconocida, sin embargo, en este estudio se logró determinar el tamaño de la población objetivo (15-49 años) en el trabajo de campo realizado previamente. Por ello, se empleó el método de cálculo de tamaño de la muestra utilizando la siguiente fórmula:

$$n = \frac{N \cdot Z^2 \cdot p \cdot q}{d^2 \cdot (N-1) + Z^2 \cdot p \cdot q}$$

Dónde:

- n = tamaño de la muestra
- N = tamaño de la población
- Z = nivel de confianza
- α = significancia
- p = probabilidad de éxito
- q = probabilidad de fracaso
- d = precisión (error máximo admisible)

Los datos utilizados por el cálculo de la muestra se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7 - Datos para el cálculo de la muestra

Datos	Descripción
N = 1346 personas	Valor obtenido en el trabajo de campo realizado
α = 0,05	Significancia, es el valor de la resta de 1 menos la confianza. La confianza para este caso es de 0,95.
Z _{0,05} = 1,96	Valor proveniente de la tabla de distribución normal
Z [*] α = 3,8416	Para obtenerlo se eleva al cuadrado el valor de Z _{0,05}
p = 0,5	50% de probabilidad de éxito
q = 0,5	50% de probabilidad de fracaso
d = 0,06	Se acepta un 6%, indica la diferencia entre el resultado obtenido si se pregunta a la muestra de la población o el que se obtendrá si se pregunta al total de la población. Para el caso de estudio se utiliza un 6% como margen de error para muestras que aproximadamente rondan los valores de 210 a 270.
d ² = 0,0036	Se eleva al cuadrado el valor de d

Fuente: Otzen y Manterola, 2017.

En la formula anteriormente expuesta se sustituyen los valores de la siguiente forma:

$$n = \frac{1346 \cdot 3,8416 \cdot 0,5 \cdot 0,5}{[0,0036 \cdot (1346-1)] + 3,8416 \cdot 0,5 \cdot 0,5}$$

$$n = \frac{1292,6984}{5,8024}$$

$$n = 222,79 \approx 223$$

Aplicando la expresión se obtuvo entonces que la muestra fue de 223. Es decir, se encuestaron 223 personas dentro del sector de Milla Central.

Después de haber calculado el tamaño de la muestra, se procedió a obtener la cantidad de personas que se encuestaron por manzana y se realizó mediante la proporción relativa que representa el número de personas por manzanas entre el total de las personas del sector de Milla Central por 100. En la Tabla 8 se observan los resultados obtenidos a partir de dicha operación.

Tabla 8 - Proporción relativa

Manzana	Población por manzana	Proporción relativa (%)
A	23	1,7087667
B	3	0,2228826
C	214	15,89896
D	89	6,6121842
E	64	4,7548291
F	50	3,7147103
G	30	2,2288262
H	49	3,640416
I	55	4,0861813
J	111	8,2466568
K	75	5,5720654
L	48	3,5661218
M	55	4,0861813
N	52	3,8612987
O	37	2,7488856
P	91	6,7607727
Q	23	1,7087667
R	74	5,4977712
S	61	4,5319465
T	42	3,1203566
U	14	1,0401189
V	71	5,2748886
W	15	1,1144131
Total	1346	100

Para conseguir la cantidad de personas que fueron encuestadas en base a la proporción de la población por manzana se dividió el porcentaje relativo entre 100 y se multiplicó por el total de la muestra, es decir, 223. Finalmente, en la Figura 5 se representa la distribución de la población encuestada por manzana.

Instrumentos de levantamiento de información

El instrumento permitió realizar preguntas específicas a las personas que posibilitaron la evaluación de la calidad del servicio de algunos locales (6) de comida rápida ubicados en el sector de Milla Central (Figura 6). En esta parte, se tienen seis casillas en la que ya estaban los lugares de establecidos ¿Por qué se consideraron estos locales? La Pizzería 4 Quesos y la Astilla obtuvieron las probabilidades más altas y son locales de competencia indirecta. Con respecto a Burger Bar y Café Makiatto se tomaron en cuenta por ofrecer hamburguesas las cuales serían de competencia directa finalmente, la Arepera Salas y Copitos por ser locales de competencia indirecta con productos diferentes, todos de competencia para Tiago's, pero con variedad en lo que ofrecen y de esta manera hacer un estudio más amplio de estos.

Figura 5 - Mapa población total Milla Central, estimación por muestreo

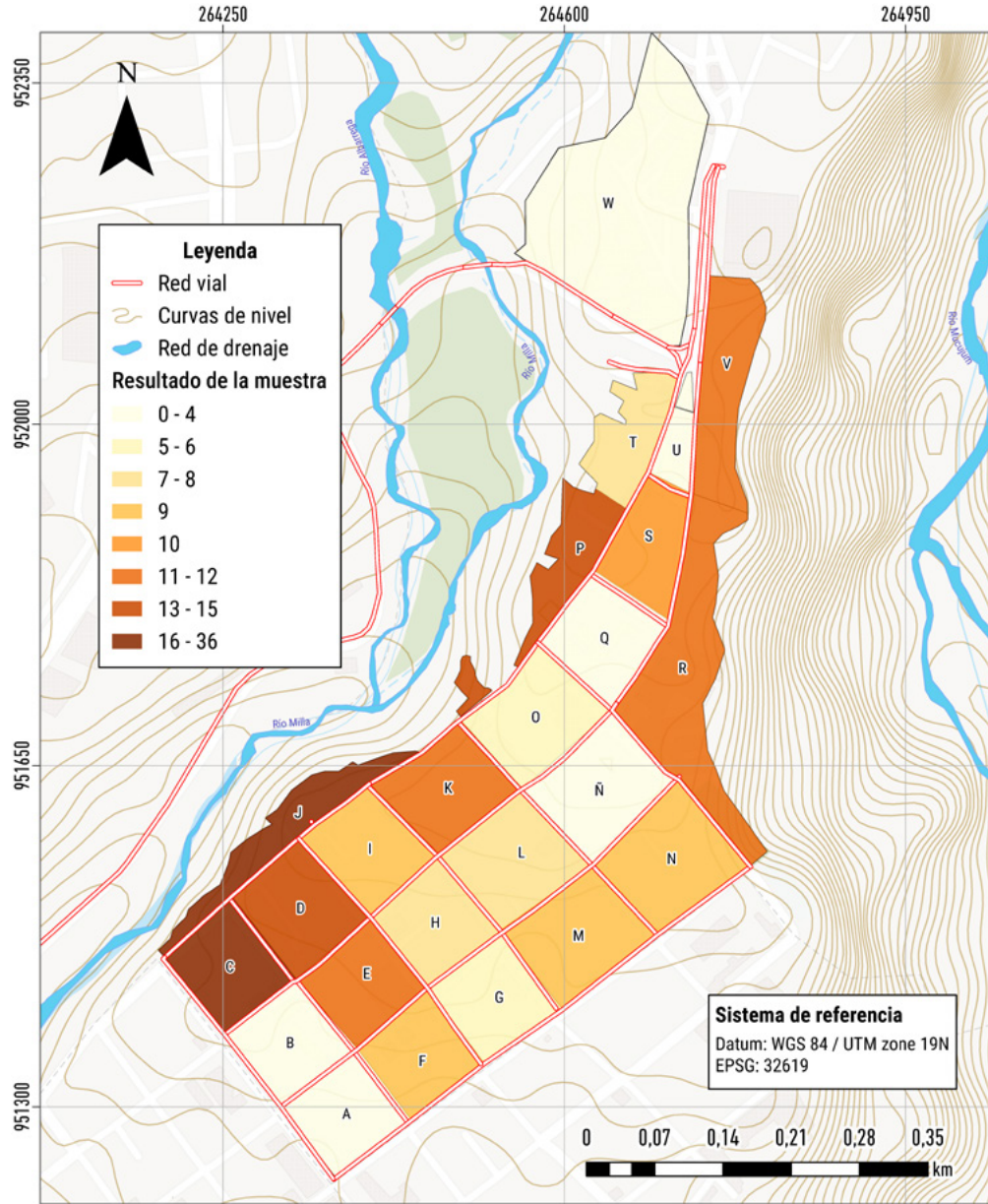
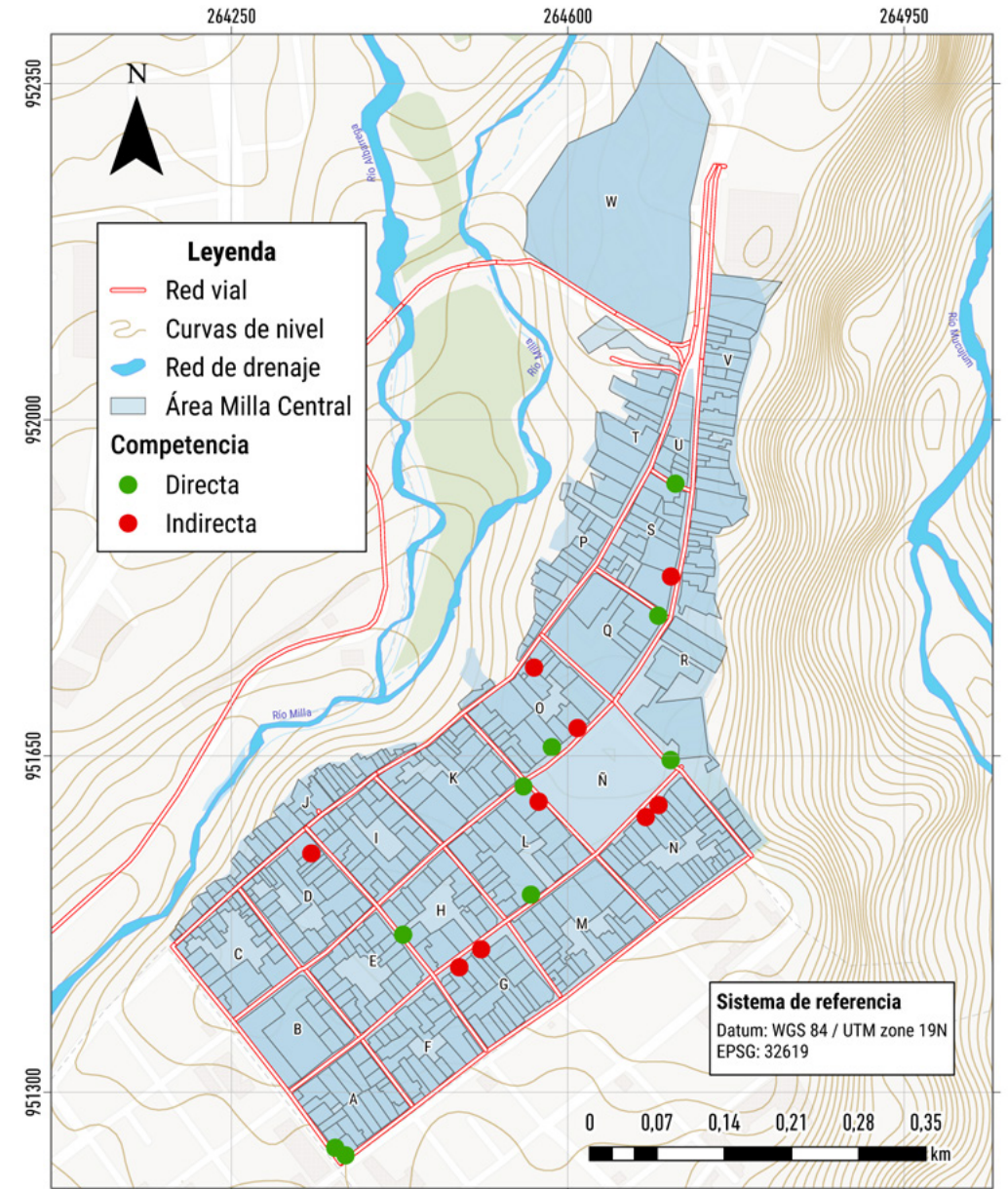


Figura 6 - Mapa de tipo de competencia de comida rápida, Milla Central



Posterior a ello, se desarrollaron una serie de opciones en alusión a este parte tales como: calidad de la atención, presentación del producto, entorno, higiene, imagen corporativa, seguridad, servicio a domicilio, calidad de la comida, cocción, aromas, sabores, otros y la casilla de observaciones. Estas se calificaron como bueno (B), regular (r) y malo (M), se marcó con un x y se hizo para cada uno de los locales. Es por eso que se le designó un número para poder evaluarlos a todos. En la Tabla 9 se puede ver lo referente a la encuesta calidad de servicio.

Este mecanismo que se utilizó también se realizó con el tiempo y el precio, reflejado en la Tabla 10. En ambas se marcó con un x según la respuesta del encuestado; dentro del tiempo se tenía: tiempo de pedido y tiempo de espera: 10-15 minutos, 15-25 min, 25-35 min y mayor a 25 min. Después, sigue otra variable importante que es el precio, valorado en dólares (aunque no es la moneda oficial es la que más se utiliza comercialmente en la actualidad) USD 1-3, USD 3-5, USD 5-7 y mayor a USD 7.

Figura 9 - Encuesta calidad de servicio

Lugares Casco Central		Calidad del Servicio																	
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1- P4 Quesos	2- Burger Bar	B						R						M					
3-Café Makiatto	4-P. La Astilla																		
5-Arepera Salas	6-Copitos																		
Presentación del producto																			
Entorno																			
Higiene																			
Imagen corporativa																			
Seguridad																			
Servicio a domicilio																			
Calidad de la comida																			
Cocción																			
Aromas																			
Sabores																			

Figura 10 - Encuesta tiempo de pedido, espera y precio de productos

Tiempo	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
	Tiempo de pedido	10-15min						15-25min						25-35min						> a 35min				
Tiempo de espera																								
Precio	1-3USD						3-5USD						5-7USD						> a 7USD					

Resultados y discusión

En esta sección, se presentarán los resultados de la aplicación del modelo de Huff en este estudio, cuyo objetivo principal ha sido diseñar una estrategia de localización para un punto de venta de comida rápida y, posteriormente, el análisis estadístico de las preferencias y percepción de calidad de los consumidores sobre los establecimientos seleccionados como competencia de Tiago's.

Análisis de la probabilidad de asistencia de los consumidores por manzanas: resultados del modelo de Huff

La aplicación del modelo ha permitido analizar cómo la distancia y el atractivo de las diferentes tiendas o centros comerciales afectan la distribución esperada de los consumidores entre estos puntos de venta. Además, se han considerado aspectos como el tamaño relativo de cada establecimiento y la densidad poblacional para afinar las previsiones y ajustar las estrategias comerciales.

Los resultados obtenidos se presentan en mapas —solo se mostrarán los mapas de los dos locales con las probabilidades más altas— y de esta manera hacer la evaluación de cuál es el lugar más adecuado para localizar a Tiago's en el sector de Milla Central. A continuación, el mapa de probabilidad de acudir a la pizzería La Astilla (Figura 7).

De acuerdo a los datos espacializados en la Figura 7, que ofrece una visión detallada sobre la distribución de las probabilidades de asistencia en diferentes áreas o manzanas en relación con “La Astilla”. Para interpretar correctamente esta información, se tiene:

1. La Astilla es el segundo local con las probabilidades de asistencia más altas. Esto sugiere que La Astilla se encuentra en una ubicación con alta demanda, según los datos del mapa.
2. La manzana L tiene el rango de probabilidad más alto (29%-32%). Es donde se localiza La Astilla, lo que indica que el local está situado en un área con la mayor concentración de potenciales clientes. La manzana K, la segunda manzana con las probabilidades más altas (25%-28%), esto sugiere que, aunque no es tan alta como la L, todavía es un área con buena demanda. Las manzanas M, N y O tienen un rango de probabilidad más bajo (17%-20%) en comparación con L y K, pero siguen siendo áreas

con una presencia significativa de clientes potenciales. Las manzanas J, I, H y R están en el rango de probabilidad de 9%-12%, tienen menos probabilidad de asistencia en comparación con las anteriores. Las manzanas B, C, E, F, G, P, Q, S, T, U, V y W, estas áreas tienen el rango de probabilidad más bajo (5%-8%), indicando que la demanda en estas manzanas es menor. Y la manzana A tiene el rango más bajo (1%-4%), lo que significa que es el área con menor probabilidad de asistencia.

De acuerdo a esta información y las probabilidades, La Astilla se encuentra en una ubicación estratégica, en la manzana L, donde la probabilidad de asistencia es alta y alrededor de esta se encuentran otras manzanas de relativa alta probabilidad de asistencia. Lo que le da una ventaja competitiva, debido a que el local está ubicado en una zona con alta demanda potencial.

Las manzanas con probabilidades más altas (L y K) son zonas clave que podrían ser consideradas para futuras expansiones o para aumentar la inversión en marketing. Las manzanas con menor probabilidad (A, B, C, etc.) representan zonas con menor interés o demanda y podrían ser menos prioritarias para futuras inversiones o aperturas de nuevos locales.

En este caso, la información sobre la distribución de probabilidades puede ayudar a optimizar la asignación de recursos, ajustar estrategias de marketing y tomar decisiones sobre la expansión o mejora de los servicios en diferentes áreas.

Ahora bien, luego de haber analizado los resultados de la probabilidad de que los consumidores acudan a La Astilla —segundo local con las posibilidades más altas— surge una interrogante: ¿Será la manzana L el mejor lugar para localizar a Tiago's?

Para poder dar respuesta a esa incógnita se debe hacer el análisis de la Pizzería 4 Quesos, que fue el local que obtuvo las probabilidades más altas de que los consumidores acudan a este teniendo dieciocho locales más de competencia en Milla Central, así como hacer uso de la información que fue levantada en campo por medio de la encuesta de la calidad del servicio.

Por lo tanto, se procede a presentar la Figura 8, donde se tiene el mapa de la probabilidad de asistencia a la pizzería 4 Quesos.

Figura 7 - Mapa de probabilidad pizzería La Astilla

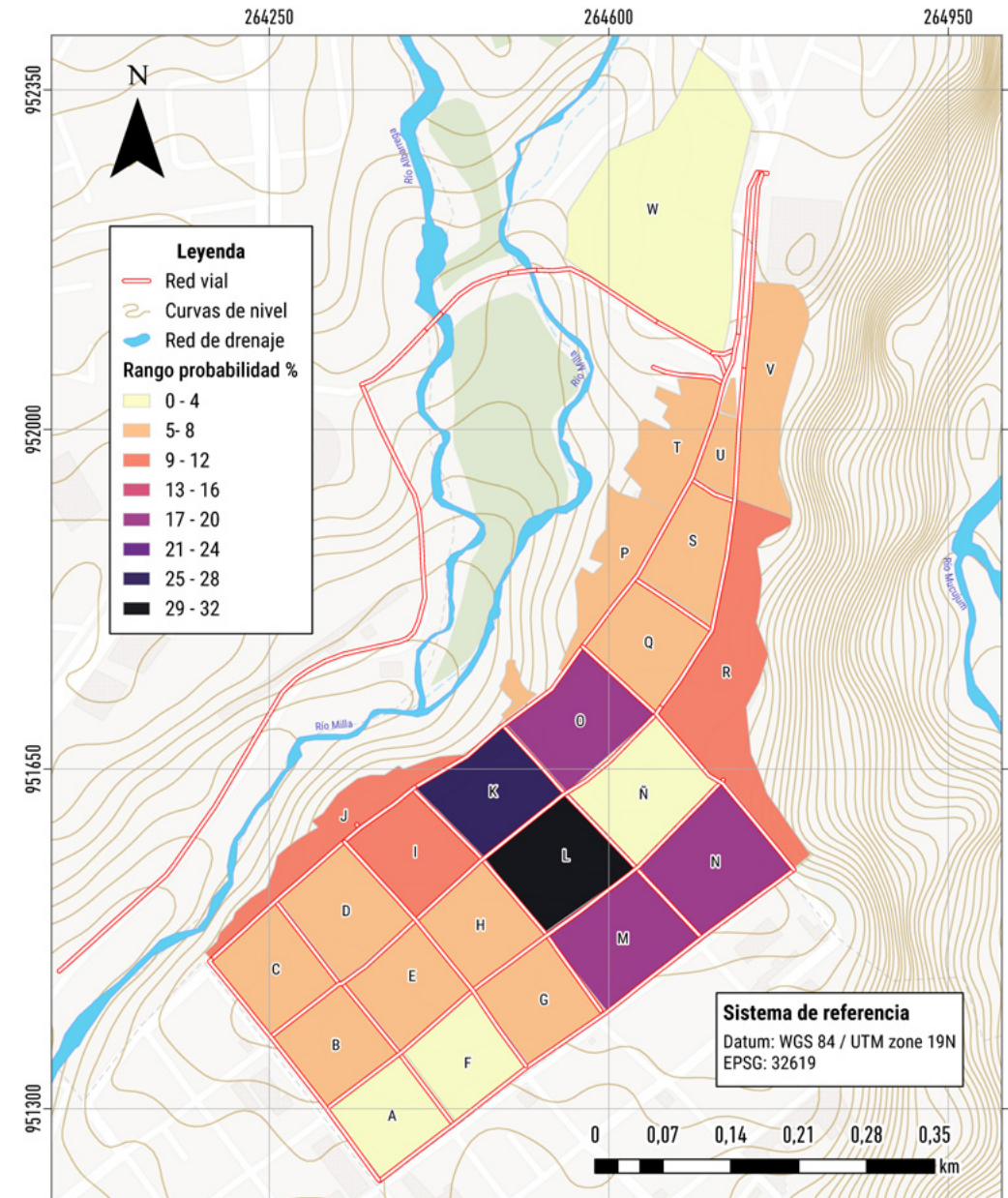
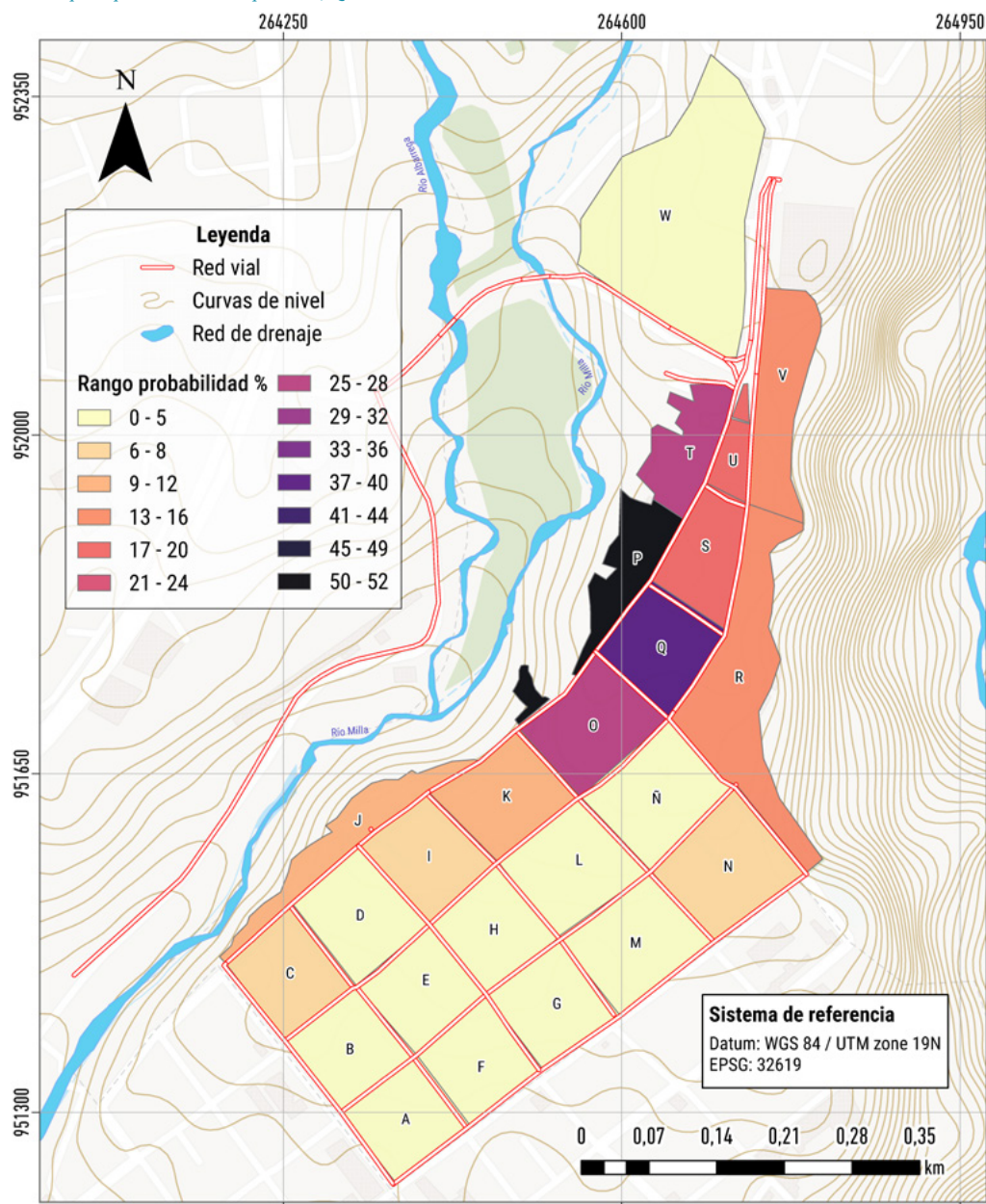


Figura 8 - Mapa de probabilidad de la pizzería 4 Quesos



Para interpretar la información proporcionada por la Figura 7 sobre la probabilidad de asistencia a la pizzería 4 Quesos en comparación con otros locales en el sector de Milla Central, se considera lo siguiente:

1. La manzana P tiene la probabilidad más alta de acudir a 4 Quesos, con un rango del 49%-52%. Esto indica que es el área con mayor preferencia por la pizzería en comparación con los otros locales de competencia en el sector.
2. Las manzanas Q y O se encuentran en las zonas de alta probabilidad. La manzana Q sigue con una probabilidad

de 37%-40%, y es la segunda mejor ubicada en términos de preferencia por la pizzería 4 Quesos. La manzana O tiene una probabilidad de 29%-32% y es significativa porque aquí se encuentra la pizzería 4 Quesos, lo que refuerza la importancia de su ubicación en esta área.

3. Las manzanas T y W tienen probabilidades de 25%-28% y 21%-24%, respectivamente. Estas zonas también muestran una preferencia relativamente alta por la pizzería, aunque no tan marcada como las áreas anteriores.

4. Las manzanas V y R tienen probabilidades de 13%-16%. Las manzanas J y K tienen probabilidades de 9%-12%. Las manzanas C, D e I tienen probabilidades de 5%-8%. Finalmente, las manzanas A, B, F, E, G, H, M, L y N tienen las probabilidades más bajas, 1%-4%.

de asistencia, quizás a través de campañas publicitarias dirigidas o promociones especiales en manzanas con probabilidades más bajas.

Preferencias y percepción de la calidad de los servicios: estudio complementario

La pizzería 4 Quesos está bien posicionada en la manzana O, que muestra una probabilidad considerable (29%-32%) de acudir al establecimiento. Esto indica que la ubicación es estratégica y aprovecha un área con una probabilidad significativa de atracción.

Las manzanas P y Q son de ubicación estratégica para la pizzería 4 Quesos debido a sus altas probabilidades de asistencia. Las estrategias de marketing y promociones podrían ser intensificadas en estas áreas para maximizar la atracción y lealtad de los clientes.

Las áreas con menor probabilidad (como A, B, F, etc.) tienen poca inclinación hacia 4 Quesos en comparación con otros locales. Puede ser menos eficiente invertir recursos significativos en estas áreas para la promoción de la pizzería.

Conociendo las zonas de alta y baja probabilidad, se pueden diseñar estrategias para captar clientes de áreas con menor probabilidad

El modelo de Huff pese a su simplicidad al considerar dos variables como la distancia de recorrido y el tamaño de los locales permite tener un resultado preciso. Sin embargo, debido a esa sencillez se tomaron algunas variables adicionales que, aunque no están incluidas en el cálculo de la probabilidad, sirven para reafirmar la decisión de localizar a Tiago's en la manzana O y permiten tener claridad sobre las posibles ventajas y desventajas, en cuanto a la calidad del servicio, de los locales de competencia.

Los resultados capturados con las encuestas se presentan en la Tabla 11, por un lado, las variables de calidad del servicio y por el otro la escala de valoración —bueno, regular, malo— para los 6 establecimientos seleccionados para esta parte del estudio. Cada valor representa un número de encuestados que expresaron su percepción sobre la calidad de los servicios.

Tabla 11 - Resultados de la encuesta de la calidad del servicio

Servicio	Pizzería 4 Quesos			Burger Bar			Café Makiatto			La Astilla			Arepera Salas			Copitos		
	Bueno	Regular	Malo	Bueno	Regular	Malo	Bueno	Regular	Malo	Bueno	Regular	Malo	Bueno	Regular	Malo	Bueno	Regular	Malo
Presentación del producto	223	0	0	102	0	0	57	8	0	88	0	0	72	40	10	195	19	9
Entorno	188	30	5	53	49	0	65	0	0	88	0	0	85	30	7	223	0	0
Higiene	223	0	0	102	0	0	65	0	0	88	0	0	101	21	0	223	0	0
Imagen corporativa	223	0	0	102	0	0	65	0	0	75	13	0	61	58	3	223	0	0
Seguridad	223	0	0	79	17	6	65	0	0	56	32	0	115	7	0	204	19	0
Servicio a domicilio	44	132	47	30	68	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Calidad de la comida	207	16	0	102	0	0	57	8	0	69	19	0	82	32	8	150	67	6
Cocción	207	16	0	102	0	0	57	8	0	69	19	0	82	32	8	150	67	6
Aromas	207	16	0	102	0	0	57	8	0	69	19	0	82	32	8	150	67	6
Sabores	207	16	0	102	0	0	57	8	0	69	19	0	82	32	8	150	67	6

Para analizar los resultados con mayor facilidad, estos resultados se estandarizaron en porcentajes. Como referencia se empleó el estudio de mercadotecnia de Del Cid Catalán, se utilizaron los porcentajes para saber si las personas estaban satisfechas

e insatisfechas con base a las respuestas de la encuesta. Para satisfecho se agruparon los resultados arrojados como bueno y para insatisfecho regular y mal. La Tabla 12 sintetiza los resultados para los seis establecimientos analizados.

Tabla 12 - Resultados de la encuesta de la calidad del servicio en porcentaje (satisfecho/insatisfecho)

Servicio	Pizzería 4 Quesos		Burger Bar		Café Makiatto		La Astilla		Arepera Salas		Copitos	
	Satisfecho (%)	Insatisfecho (%)	Satisfecho (%)	Insatisfecho (%)	Satisfecho (%)	Insatisfecho (%)	Satisfecho (%)	Insatisfecho (%)	Satisfecho (%)	Insatisfecho (%)	Satisfecho (%)	Insatisfecho (%)
Presentación del producto	100	0	100	0	88	12	100	0	59	41	87	13
Entorno	84	16	52	48	100	0	100	0	70	30	100	0
Higiene	100	0	100	0	100	0	100	0	83	17	100	0
Imagen corporativa	100	0	100	0	100	0	85	15	50	50	100	0
Seguridad	100	0	77	23	100	0	64	36	94	6	91	9
Servicio a domicilio	20	80	29	71	-	-	-	-	-	-	-	-
Calidad de la comida	93	7	100	0	88	12	78	22	67	33	67	33
Cocción	93	7	100	0	88	12	78	22	67	33	67	33
Aromas	93	7	100	0	88	12	78	22	67	33	67	33
Sabores	93	7	100	0	88	12	78	22	67	33	67	33

En las Tablas 13 y 14, se presentan los resultados obtenidos con respecto a las variables tiempo y precio de cada uno de los locales de comida rápida, en conjunto con las variables anteriores sirvieron

para saber cuáles son las insatisfacciones de los consumidores y conocer las ventajas competitivas que puede construir Tiago's.

Tabla 13 - Resultados de la encuesta de los tiempos de pedido y espera

Rangos de tiempo (minutos)	Pizzería 4 Quesos		Burger Bar		Café Makiatto		La Astilla		Arepera Salas		Copitos	
	Satisfecho (%)	Insatisfecho (%)	Satisfecho (%)	Insatisfecho (%)	Satisfecho (%)	Insatisfecho (%)	Satisfecho (%)	Insatisfecho (%)	Satisfecho (%)	Insatisfecho (%)	Satisfecho (%)	Insatisfecho (%)
10-15	164	0	72	0	65	0	88	0	98	43	117	0
15-25	59	0	30	24	0	43	0	0	24	79	106	148
25-35	0	0	0	29	0	12	0	50	0	0	0	45
35 - más	0	223	0	49	0	10	0	38	0	0	0	30

Análisis de los resultados

La aplicación del modelo de Huff permitió identificar dos opciones para localizar a Tiago's, es decir, la manzana L —considerando que allí se localiza el segundo local con las probabilidades más altas de asistencia de los consumidores— y la manzana O —lugar que generó las probabilidades más altas—.

Ahora bien, en cuanto a los datos sobre la percepción de la calidad del servicio, la mayoría de los establecimientos de la competencia presentan una buena presentación e higiene de los productos; la calidad de la comida, cocción, aromas y sabores son frecuentemente bien valorados, aunque algunos locales muestran áreas para mejorar; la imagen corporativa presenta una amplia gama de satisfacción, con Arepera Salas y La Astilla mostrando áreas significativas de insatisfacción.

La seguridad presenta una variedad de puntuaciones, desde un bajo 44% en Pizzería 4 Quesos hasta un alto 94% en Arepera Salas. Esto indica que algunos establecimientos necesitan mejorar sus medidas de seguridad y representa uno de los desafíos de los establecimientos del área de estudio. Finalmente, la categoría de servicio a domicilio no fue evaluada en todos los establecimientos, por lo que no se puede hacer un análisis comparativo, sin embargo, se identifica como otro de los desafíos.

De este análisis se sugiere enfocarse en la seguridad, priorizar las áreas con mejor seguridad o establecer medidas para mejorarla. También, se debe optimizar la imagen corporativa, es decir, trabajar en la percepción de la imagen corporativa, especialmente en lugares con puntuaciones más bajas. Por último, incluir una evaluación de servicio a domicilio, realizar encuestas sobre el servicio a domicilio para obtener una imagen completa del servicio y la demanda de la población.

Este análisis proporciona una visión general del desempeño de los establecimientos en diferentes aspectos del servicio, ayudando a identificar áreas fuertes y oportunidades, referencias para la localización de Tiago's.

Tal y como se observa, existe una variedad de respuestas de las cuales Tiago's puede tomar acciones, ya que prácticamente en todas las categorías incluidas en la encuesta presenta cierto porcentaje de insatisfacción.

Para refinar un poco el análisis y tomar la decisión de localización de Tiago's se decidió revisar los valores de los locales de las manzanas L y O. Los competidores localizados en la manzana L, específicamente la Pizzería La Astilla, presenta valores insatisfactorios en algunas categorías, tiene la ventaja del entorno en el que se desenvuelve porque se ubica justo frente a la plaza de Milla, aun así, la desfavorece el hecho de estar ubicada en la calle 14, donde se ve afectada la seguridad por la poca iluminación pública y la cercanía a una zona popular.

En el caso de la manzana O, donde se ubican la Pizzería 4 Quesos y Café Makiatto, igualmente ubicados frente a la plaza de Milla,

obtuvieron 100% de satisfacción en lo que respecta a la seguridad y el entorno, la percepción de mayor seguridad y un mejor entorno puede ser debido a que esta manzana se ubica al frente de la plaza y su arteria vial es una avenida, con mejor iluminación, más transitada por peatones y por transporte público y privado.

En conclusión, los resultados del modelo de localización de Huff destacan las manzanas L y O con las mayores probabilidades de asistencia de los consumidores y el análisis estadístico de las preferencias y percepción de la calidad de los servicios reafirma que la manzana O representa la mejor opción de localización para Tiago's, por sus ventajas en términos de seguridad y entorno.

A fin de puntualizar, es importante aclarar que la estrategia de localización de Tiago's corresponde con todo el proceso realizado. En este sentido, elegir el modelo de localización, seleccionar el perfil del consumidor, conocer la competencia, analizar la percepción de los clientes, forman parte de ese planeamiento que se debe considerar para lograr conseguir el lugar más óptimo.

Conclusiones

Utilizando el modelo de Huff, que calcula la probabilidad de que un consumidor elija una tienda en función de su atraktividad, sugiere que la facilidad de acceso a las ubicaciones, en términos de proximidad a los clientes potenciales y la conectividad desplazamientos, juega un papel crucial en la decisión de localización. Las ubicaciones que están bien conectadas y accesibles son preferidas por los clientes. El análisis ha mostrado que las áreas con menor concentración de competencia directa, pero con una buena puntuación en atraktividad y accesibilidad, tienen un mayor potencial para ubicar Tiago's. El modelo de Huff ayudó a identificar estas áreas óptimas al evaluar cómo la presencia de competidores puede influir en la captación de clientes.

Por su parte, el análisis estadístico de las preferencias y percepción de la calidad de los servicios, como estudio complementario, revela que los clientes valoran altamente la calidad del servicio, con un enfoque particular en la presentación del producto, higiene y calidad de la comida. Esto sugiere que Tiago's debería priorizar estas características en para satisfacer las expectativas del cliente. Sin embargo, las percepciones sobre la seguridad y el entorno resultaron determinantes para reforzar la búsqueda de la localización del establecimiento, debido a que las otras variables están más vinculadas con una gestión interna del negocio y no con las externalidades del lugar.

Las ubicaciones con alta satisfacción en aspectos clave como el entorno son preferidas por los clientes. Esto indica que Tiago's debería buscar ubicaciones que puedan replicar estos factores positivos. Las áreas con buenas puntuaciones en estos aspectos están asociadas con una mayor probabilidad de atraer y retener clientes.

Una vez culminada las distintas fases de este proceso de investigación, se puede precisar que la metodología aplicada permitió

alcanzar el objetivo planteado, que fue diseñar una estrategia de localización a través del *geomarketing* para una empresa de comida rápida en Milla Central, la misma contempló una revisión documental bastante amplia de los modelos de localización para, posteriormente, considerar el modelo de Huff.

Se logró identificar y conocer la distribución espacial de los locales de competencia directa e indirecta, información que fue fundamental para conocer el tamaño de estos, y realizar los cálculos de probabilidad.

Se examinaron diferentes fuentes en las que se pudiese constatar cuáles eran las edades promedio de las personas que consumen este tipo de alimentos y así, a través del trabajo de campo con la aplicación de la encuesta, obtener los datos necesarios para medir la percepción de los consumidores con respecto a los locales seleccionados y finalmente, complementar el análisis de este trabajo de investigación.

Por otra parte, el proceso investigativo demostró que la metodología utilizada es útil para estimar lugares óptimos, a pesar de la simplicidad que presenta, al contener solo dos variables físicas, es decir, la distancia y el tamaño.

Referencias

- Aniés Val, A. (2017). Comportamiento del consumidor de comida rápida: el caso de la ciudad de Huesca [Tesis de licenciatura en Administración y Dirección de Empresas, Universidad de Zaragoza]. <https://zaguan.unizar.es/record/64736?ln=es>
- Baer, L. E. y del Río, J. P. (2021). Política urbana neoliberal y gestión de suelo en la RMBA en la década del diez: legislación urbana, subasta de inmuebles públicos y acceso al hábitat digno. *Punto Sur* 4(7), 164-184. <http://doi.org/10.34096/psn.4.10407>
- Baviera Puig, M. A., Buitrago Vera, J.M. y Rodríguez Barrio, J. E. (2012). Análisis metodológico del modelo de interacción espacial MCI. *Documentos de Trabajo de la Cátedra Fundación Ramón Areces de Distribución Comercial (DOCFRADIS)*. (8)1-22. <https://riunet.upves/handle/10251/60787>
- Becerra Valbuena, L. G. (2013). Aproximaciones microeconómicas en la Teoría de los Lugares Centrales de Christaller. *Ensayos sobre Política Económica* 31(70), 67-120. [https://doi.org/10.1016/S0120-4483\(13\)70030-7](https://doi.org/10.1016/S0120-4483(13)70030-7)
- Castro Pérez, M. P. y Quintero Venegas, G. J. (2022). Interacción espacial de la dinámica turística de los Pueblos Mágicos de Zacatlán y Chignahuapan, Puebla. *Investigaciones Geográficas*, (64), 66-81. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2022.67994>
- Cerrada, G. (31 de mayo de 2024). El incendio del mercado principal de Mérida cumple 37 años. *Notiféricas*. <https://notiféricas.blogspot.com/2023/05/el-incendio-del-mercado-principal-de-h.html>
- Del Cit Catalán Y. L. J. (2018). *Calidad de los servicios y satisfacción del cliente en el restaurante Pizza Burger Diner, ubicado en la cabecera del departamento de Zacapa* [Tesis de licenciatura en Mercadotecnia - Universidad Pafael Nadvívar]. <http://186.151.197.48/tesisjrcd/2018/01/04/DelCidYasser.pdf>
- Diario Libre. (2 de febrero de 2021). Cinco alimentos que no debes consumir si eres mayor de 50 años. *Diario Libre*. <https://www.diariolibre.com/estilos/evergreen/cinco-alimentos-que-no-debes-consumir-si-eres-mayor-de-50-anos-KO23873669>
- Escuela de Geografía. (2014). *Censo comunitario del Consejo Comunal Milla Central. Servicio Comunitario de la Escuela de Geografía*, Universidad de Los Andes.
- Freites, D. A. (2019). *Estudio de gravitación comercial en grandes superficies: el caso Villa Allende Shopping* [Tesis de Maestría, Universidad Siglo 21 – Escuela de Negocios "José Gai"]]. <https://repositorio21.edu.ar/bitstream/handle/ues21/18237/Dario%20Freites.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Garrocho Rangel, C. (2003). La teoría de interacción espacial como síntesis de las teorías de localización de actividades comerciales y de servicios. *Economía, Sociedad y Territorio* 4(14), 203-251.
- Garrocho Rangel, C. (2011). *Localización de servicios en la planeación urbana y regional: aspectos básicos y ejemplos de aplicación*. El Colegio Mexiquense.
- Huff, D. L. (1964). Defining and Estimating a Trading Area. *Journal of Marketing*, 28(3), 34-38.
- Instituto Nacional de Estadísticas. (2024). Proyección de la población al 30 de junio, según entidad federal, municipios y parroquias. *Ministerio del Poder Popular de Planificación*. http://www.inec.gov.ve/index.php?option=com_content&view=category&id=98&Itemid=51
- Maldonado M. (2021). Los alimentos más dañinos para la salud del adulto mayor. *Adultosmayores.net*. <https://www.adultosmayores.net/los-alimentos-mas-daninos-para-la-salud-del-adulto-mayor/>
- Montejano J. y Cruz G. (2018). Modelos de localización para geomarketing. *Revista Espacialidades* [Revista en línea], 8. http://espacialidades.cua.uam.mx/volo8/2018/01/06_MontejanoCruz.php
- Otzen, T. y Manterola, C. (2017). Técnica de muestreo sobre una población de estudio. *International Journal de Morphology*, 35(1), 227-232. <http://doi.org/10.4067/S0717-95022017000100037>
- Palacios Orejuela, I. (2018). Aplicación del modelo de Christaller para la distribución espacial de supermercados. *Maskana* 9(2), 9-16. <https://doi.org/10.18537/mskn.09.02.02>
- Pereira, C. (2004). *Microeconomía*. Universidad Centroamericana: Módulo Autoformativo 12. <http://repositorio.uca.edu.ni/3268/1/Microeconomia.pdf>
- Ramos Galarza, C. A. (2020). Los alcances de una investigación. *CienciaAmérica*, 9(3), 1-6. <https://doi.org/10.33210/ca.v9i3.336>

Pares académicos

Alba Luz González Pinto	José Mario Mayorga Henao
Antonio Gutiérrez Clavijo	Juan Carlos González Murcia
Aslenis Melo Ríos	Juan Carlos Torres Palma
Bersaida Rentería Beleño	Juan Felipe Mendieta Daza
Camilo Alexander León Sánchez	Kuay Kubilay Rodríguez Ramírez
Carlos Enrique Castro	Leonor Ayde Rodríguez Rojas
Carmen Elena Meza	Libia Esperanza Nieto Gómez
Cindy Lizeth Urueña Suárez	Luis Francisco Balza Moreno
Daniel Ojeda Cruz	Margoth Rocío Mera Garzón
Dayana Patricia Beltrán	Martha Isabel Bernal Mora
Edier Vicente Aristizábal Giraldo	Miguel Ángel García Parra
Fredy Yobani Díaz Mila	Ricardo Ceballos
Gelber Rosas Patiño	Rodolfo Lizcano Toledo
Gina Constanza Méndez Parra	Rodolfo Yesid Meza
Gina Marcela Amado Saavedra	Sebastián David García Guzmán
Gloria Elena Estrada Cely	Sebastián Sierra Bernal
Gloria Yulier Cadena-Montero	Txomin Bornaetxea Estela
Harold Alexander Villamil Castillo	Victoria Daniela Camacho Ochoa
Héctor Mauricio Ramírez Daza	
Jader Muñoz Ramos	
Jeison Andrés Hincapié Rodríguez	Colaboradores
Jhennifer Almonacid Velosa	Gloria Yulier Cadena-Montero
Joel Francisco Mejía Barazarte	Yenny Andrea Marín
Jonny Alberto Santiago Guerrero	Jesús Alberto Ortiz Narváez
Jorge Alessandri Romero Novoa	Lou Daniela Barboza
José Luis López López	Suhaira Patricia Kharfan Piñeres
	Jaime Ricardo Pazmiño Rosas

La impresión de esta publicación fue realizada por la Imprenta Nacional de Colombia, utilizando tintas formuladas a base de aceite de soya, una elección que minimiza el impacto negativo en el medio ambiente. Además, se emplearon planchas ECO3 como una alternativa más ecológica en la impresión offset, destacando su capacidad para reducir el consumo de agua y productos químicos durante el proceso, así como promover la durabilidad y reutilización. Esta filosofía de la Imprenta Nacional representa un compromiso sólido con la sostenibilidad en la impresión en Colombia, contribuyendo significativamente a la preservación del medio ambiente.



ECO3

CENTRALink
CORPORATION

www.imprenta.gov.co
PBX (0571) 457 80 00
Carrera 66 No. 24-09
Bogotá, D. C. Colombia

